



TUGAS AKHIR - TM091585

PEMODELAN DAN ANALISA RESPON DINAMIS DAN ENERGI BANGKITAN DARI HYDRO-MAGNETO ELECTRIC REGENERATIVE SHOCK ABSORBER PADA SISTEM SUSPENSI KERETA API DENGAN BOGIE TIPE NT-11

**RIFQI MUQORROBIN
NRP. 2113 105 025**

**Pembimbing:
Dr. Eng Harus Laksana Guntur, ST. M.Eng**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016**



FINAL PROJECT - TM091585

MODELLING AND ANALYSIS DYNAMIC RESPONSE AND POWER FROM HYDRO-MAGNETO ELECTRIC REGENERATIVE SHOCK ABSORBER ON TRAIN SUSPENSION WITH BOGIE NT-11

RIFQI MUQORROBIN
NRP. 2113 105 025

Advisor

Dr. Eng Harus Laksana Guntur, ST. M.Eng

DEPARTEMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty of Technology
Institute of Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

LEMBAR PENGESAHAN

PEMODELAN DAN ANALISA RESPON DINAMIS DAN ENERGI BANGKITAN DARI HYDRO- MAGNETO ELECTRIC REGENERATIVE SHOCK ABSORBER PADA SISTEM SUSPENSI KERETA API DENGANBOGIE TIPE NT-11

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat

Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Sistem Dinamis dan Vibrasi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Rifqi Muqorrobin

Nrp. 2113 105 025

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Dr. Eng. HarusLaksana Guntur, ST,M,Eng.....(Pembimbing I)
(NIP. 19750511 19990310 01)
2. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT.....(Penguji I)
(NIP. 19700412 19970320 03)
3. Moch.Solichin, ST, MT.....(Penguji II)
(NIP. 198908172015041003)
4. Aida Annisa Amin D ,ST,MT.....(Penguji III)
(NIP.198907052015042005)

SURABAYA
Januari, 2016

**PEMODELAN DAN ANALISA RESPON DINAMIS DAN
ENERGI BANGKITAN DARI HYDRO- MAGNETO
ELECTRIC REGENERATIVE SHOCK ABSORBER PADA
SISTEM SUSPENSI KERETA API DENGAN BOGIE TIPE
NT-11**

Nama Mahasiswa : Rifqi Muqorrobin
NRP : 2113105025
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST.
M.Eng

ABSTRAK

Kebutuhan bahan bakar kereta api 3 km/liter untuk tenaga penggerak dan 25-30 liter per jam untuk penerangan dan pendinginan ruangan. Hanya 10-16% energi dari bahan bakar yang terpakai sebagai tenaga pendorong dan sisanya terbuang pada panas mesin dan pengereman. Suspensi merupakan bagian yang memiliki potensi sebesar 5-6 kW. Salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi adalah dengan menggunakan Hydro-Magneto Electric Regenerative Shock Absorber (HMERSA)

Pada Tugas Akhir ini akan dilakukan pemodelan dan analisa respon dinamis dan energi bangkitan dari HMERSA pada kereta api. Input yang diberikan pada simulasi ini yaitu input sinusoidal dengan variasi kecepatan 20, 40 , 60 km/jam dan bump yang dimodifikasi.

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa semakin besar input sinusoidal yang diberikan pada maka gaya redam yang diberikan akan semakin besar. Aplikasi HMERSA pada kereta api didapatkan output kelistrikan arus listrik sebesar 5A, energi bangkitan 100 W, Tegangan sebesar 20 V. Dari grafik RMS didapatkan bahwa penggunaan kereta api dengan HMERSA ditujukan pada kereta api jarak dekat dengan kecepatan 30 km/h.
Kata Kunci : Kereta Api, Suspensi kereta api, HMERSA, Matlab , daya listrik bangkitan, respon dinamis.

MODELLING AND ANALYSIS DYNAMIC RESPON AND POWER FROM HYDRO- MAGNETO ELECTRIC REGENERATIVE SHOCK ABSORBER ON TRAIN SUSPENSION WITH BOGIE NT-11

Name : Rifqi Muqorrobin
NRP : 2113105025
Department : Teknik Mesin FTI-ITS
Academic supervisor :Dr. Eng. Harus Laksana
Guntur, ST. M.Eng

ABSTRACT

Necessary of fuel energy of train are 3km/liter for engine energy and 25-30 litre are for lighting and conditioning. From research only 10-16 % energy from fuel gas are use for engine energy and the rest as engine heat, heat losses, and engine brake. Suspension part is having potential energy 5-6 kW. One method to upgrade efficiency is using Hydro Magneto Electric Regenerative Shock Absorber (HMERSA)

In this Final Project is modeling and analysis dynamic respon and power from HMERSA in train with properties from real scale and simulation with MATLAB. Input for this simulation are sinusoidal with three variation 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h and bump modified. Sinusoidal is modeling for condition railway track and bump modified is modeling for connection between two railway track.

From this research is conclusion that greater sinusoidal input for HMERSA, Dumping Force is greater.HMERSA application for train obtain electric output for electric torque 700 N, current 5A, Power 100 W, and voltage 20 V. The minimum displacement for sinusoidal input is 40 km/h. For RMS graphic is conclusion that HMERSA is effective when the velocity 30 km/h.

Keyword : Train, Suspension, HMERSA, Matlab, Power, Dynamic Respon

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan kekuatan dan limpahan rahmat, karunia, dan hidayahnya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan Tugas Akhir yang berjudul “ **Pemodelan dan Analisa Respon Dinamis dan Energi Bangkitan dari Hydro-Magneto Elektrik Regenerative Shock Absorber pada Sistem Suspensi Kereta Api dengan Bogie tipe NT-11**”

Tugas Akhir ini merupakan persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik bidang studi Desain jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa Tugas Akhir ini tersusun dari adanya bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Kedua orang tua dan keluarga yang selalu mendukung baik secara moril maupun materiil dan tak pernah lelah member dukungan dan kasih sayang.
2. Bapak Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST. M.Eng selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan arahan dan petunjuk dalam penulisan tugas akhir ini.
3. Ibu Dr. Wiwiek Hendrowati, ST. MT, ibu Aida Annisa Amin Daman, ST. MT, dan Bapak Mochammad Solichin, ST. MT. selaku dosen penguji Tugas Akhir.
4. Bapak Soni Supriyoni selaku asisten manager bagian Bogie PT. Kereta Api Indonesia (PERSERO) Balai Yasa Gubeng Surabaya yang sudah memudahkan dalam pengambilan data Tugas Akhir
5. Teman-teman Lintas jalur Teknik Mesin ITS angkatan 2013 ganjil.
6. Segenap pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah bekerja sama dan memfasilitasi penulis hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.

Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat untuk semua pihak khususnya di bidang studi Desain jurusan Teknik Mesin FTI-ITS Surabaya dan pada umumnya bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	xi
Daftar Tabel.....	xv
Daftar Simbol	xvii
Pendahuluan	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat penelitian	3
1.6 Sistematika penelitian	3
Tinjauan Pustaka	
2.1 Penelitian terdahulu	
2.1.1 Reduksi Getaran pada Kereta Api cepat.....	5
2.1.2 Analisa Tegangan Dinamik pada Bogie Kereta Api ...	6
2.1.3 Pemodelan Interaksi Dinamik pada kereta Api dan jembatan.....	8
2.1.4 Regenerative Shock Asorber jenis Hidrolik	9
2.1.5 Dinamika Gerak pada Bogie dan Gerbong Kereta Api	10
2.1.6 Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber.....	11
2.2 Komponen Kereta Api	
2.2.1 Gerbong.....	13
2.2.2 Rel dan Bantalan.....	14
2.2.3 Bogie	15
2.3 Teori Vibrasi Suspensi Kendaraan	
2.3.1 Motion of Base	19
2.4 Persamaan pada Mekanisme Hidraulik	
2.4.1 Persamaan Konsevasi Massa	20
2.4.2 Persamaan Momentum Fluida	21
2.4.3 Hukum Bernoulli	22
2.4.4 Hukum Pascal.....	22
2.4.5 Head Loss	23
2.5 Elektromagnetik.....	27

2.6 Motor Hidrolik.....	28
2.7 Simulink Matlab	29
2.8 Pengaruh Percepatan Kendaraan Terhadap Manusia	30
Metodologi	
3.1 Metodologi Penelitian	33
3.2 Tahap Studi Literatur	35
3.3 Tahap Pemodelan Sistem HMERSA.....	35
3.3.1 Gambar Skema HMERSA.....	35
3.3.2 Cara Kerja HMERSA.....	36
3.4 Penurunan Rumus HMERSA	37
3.5 Tahap Pemodelan Matematis Half Train.....	38
3.5.1 Pemodelan Free Body diagram.....	39
3.6 Pembuatan Blok Simulasi.....	40
3.7 Analis Hasil	45
Pemodelan Sistem	
4.1 Pemodelan dinamis sistem HMERSA.....	47
4.1.1 Skema sistem hidrolik	47
4.1.2 Motor hidrolik, gear, dan torsi elektrik pada Generator	50
4.1.3 Pesamaan Generator yang dilinearakan	52
4.2 Pemodelan Dinamis seperempat kendaraan dengan Penambahan HMERSA.....	53
4.3 Diagram blokt kendaraan	
4.3.1 Diagram blok HMERSA	55
4.3.2 Diagram blok sistem seperempat kendaraan Dengan penambahan HMERSA	58
4.3.2.1 Profil jalan pada pengujian seperempat Kendaraan.....	58
4.3.2.2 Pemodelan kereta api seperempat kendaraan	61
Pembahasan	
5.1 Pembahasan	63
5.2 Gaya Redam HMERSA.....	63
5.2.1 Grafik arus, tegangan, torsi elektrik, daya bangkitan terhadap perpindahan dan kecepatan HMERSA pada input 1,364 Hz	65

5.3 Respon Dinamis dan daya listrik bangkitan dari aplikasi HMERSA pada kereta api.....	67
5.3.1 Grafik Respon dinamis pada kendaraan dengan Input bump yang dimodifikasi	67
5.3.1.1 Grafik respon kelistrikan akibat input Bump yang dimodifikasi	68
5.3.2 Grafik respon dinamis pada kendaraan dengan HMERSA pada input sinusoidal.....	69
5.3.2.1 grafik respon dinamis dengan input Kecepatan 20 km/h, 40 km/h, dan 60 km/h	69
5.3.2.2 Grafik respon dinamis pada massa sprung dan unsprung dengan input 20 km/h, 40 km/h dan 60 km/h	71
5.3.2.3 Grafik kelistrikan pada kereta api dengan input Kecepatan 20 km/h, 40 km/h, dan 60 km/h	74
5.4 Perbandingan respon dinamis pada kereta api dengan Menggunakan suspense konvensional dan HMERSA	77
5.4.1 Perbandingan respon dinamis pada kereta api Dengan suspense konvensional dan HMERSA pada Input bump yang dimodifikasi	78
5.4.2 Perbandingan respon dinamis pada kereta api dengan suspensi konvensional dan HMERSA pada input sinusoidal pada kecepatan 20 km/h, 40 km/h, dan 60 km/h	79
5.5 Grafik RMS (Root mean Square).....	82
5.5.1 Grafik RMES percepatan bodi kendaraan pada Input sinusoidal dengan variasi kecepatan	82
5.5.2 Grafik Displacement Transmissibility pada input Sinusoidal dengan variasi kecepatan.....	84
Kesimpulan dan Saran	
6.1 Kesimpulan.....	87
6.2 Saran.....	89

Halaman Ini sengaja Dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Potensi energy yang dapat dimanfaatkan pada suspensi.....	2
Gambar 2.1 Pemodelan setengah bagian kereta api.....	5
Gambar 2.2 Perbandingan displacement pada 3 jenis kereta ...	6
Gambar 2.3 Pemodelan pad frame bogie	7
Gambar 2.4 Pemodelan Kereta Api	7
Gambar 2.5 Gaya-gaya pada bogie kereta api.....	7
Gambar 2.6 Perbandingan antara Tekanan dan beban torsi	8
Gambar 2.7 Pemodelan kereta api dan jembatan.....	8
Gambar 2.8 Besar direct flexibility dan beban static 100 kN dan 180 kN.....	9
Gambar 2.9 Skema dari RSA hidrolik	9
Gambar 2.10 Grafik dari energy bangkitan yang dihasilkan Oleh RSA hidrolik	10
Gambar 2.11 Pemodelan ¼ model kereta api.....	11
Gambar 2.12 Konstruksi HMRSA dari Kapsul Anuar.....	12
Gambar 2.13 Prinsip kerja HMRSA dari Kapsul Anuar	12
Gambar 2.14 Hasil energy bangkitan yang dihasilkan oleh HMRSA.....	12
Gambar 2.15 Spesifikasi gerbong penumpang	13
Gambar 2.16 Bagian-bagian bogie	15
Gambar 2.17 Stoper pada pegas primer	16
Gambar 2.18 Pegas Ayun Bogie.....	16
Gambar 2.19 Gerbong tanpa bogie (atas), gerbong dengan bogie (bawah)	17
Gambar 2.20 Kenyamanan pada bogie kereta api	18
Gambar 2.21 base Excitation.....	19
Gambar 2.22 Force Transmissibility.....	20
Gambar 2.23 Penerapan hukum Bernoulli pada penampang...	22
Gambar 2.24 Grafik enlargements dan contraction loss Coefficient.....	24
Gambar 2.25 Grafik nilai equivalent length (L_e/D)	25
Gambar 2.26 Skema elektromagnetik dan generator	27

Gambar 2.27 Contoh diagram blok simulink	30
Gambar 2.28 Ketahanan badan manusia terhadap percepatan .	31
Gambar 3.1 Diagram alir Tugas Akhir	34
Gambar 3.2 Skema HMERSA dan bentuk fisik HMERSA	35
Gambar 3.3 Aliran fluida saat piston kompreis	36
Gambar 3.4 Aliran fluida saat piston ekspansi	37
Gambar 3.5 Diagram alir penurunan rumus HMERSA	38
Gambar 3.6 Skema 2D dan bentuk fisik gerbong	39
Gambar 3.7 Skema 2D dan bentuk fisik bogie	39
Gambar 3.8 Free body diagram half train	40
Gambar 3.9 Diagram alir pembuatan blok simulasi Sistem HMERSA	43
Gambar 3.10 Pembuatan blok diagram model setengah Kendaraan	44
Gambar 4.1 Silinder hidrolik pada HMERSA	47
Gambar 4.2 Free body diagram pada pasangan gear	50
Gambar 4.3 Pemodelan setengah kendaraan dan Seperempat kendaraan	53
Gambar 4.4 Free bodi diagram massa unsprung dan sprung	54
Gambar 4.5 Diagram blok simulink HMERSA	55
Gambar 4.6 Diagram blok simulink silinder hidrolik	56
Gambar 4.7 Digarm blok simulink headloss total	56
Gambar 4.8 Diagram blok simulink spur gear	57
Gambar 4.9 Diagram blok simulink torsi elektrik	57
Gambar 4.10 Diagram blok simulink arus listrik	58
Gambar 4.11 Diagram blok simulink tegangan listrik	58
Gambar 4.12 Profil jalan input sinusoidl	59
Gambar 4.13 Profil jalan input bump modifikasi	61
Gambar 4.14 Diagram blok simulink bump modifikasi	60
Gambar 4.15 Diagram blok simulink seperempat kendaraan ..	61
Gambar 5.1 Grafik respon gaya redam HMERSA	63
Gambar 5.2 Grafik torsi elektrik HMERSA	65
Gambar 5.3 Grafik arus HMERSA	65
Gambar 5.4 Grafik tegangan HMERSA	66
Gambar 5.5 Grfik daya bangkitan HMERSA	66

Gambar 5.6 Grafik respon dinamis input bump	67
Gambar 5.7 Respon kelistrikan input bump	69
Gambar 5.8 Grafik respon dinamis massa sprung	70
Gambar 5.9 Perpindahan pada kereta api dengan variasi input	71
Gambar 5.10 Kecepatan pada kereta api	72
Gambar 5.11 Percepatan pada kereta api	73
Gambar 5.12 Arus listrik yang dihasilkan	74
Gambar 5.13 Grafik torsi elektrik pada kereta api	75
Gambar 5.14 Grafik tegangan listrik	76
Gambar 5.15 Grafik energi bangkitan pada kereta api	77
Gambar 5.16 Grafik respon dinamis input bump	78
Gambar 5.17 Grafik respon dinamis input sinusoidal 20 km/h	79
Gambar 5.18 Grafik respon dinamis input sinusoidal 40 km/h	80
Gambar 5.19 Grafik respon dinamis input sinusoidal 60 km/h	81
Gambar 5.20 Respon percepatan RMS input sinusoidal	83
Gambar 5.21 Grafik X_{RMS}/X_0 terhadap kecepatan	85

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Minor Loss Coefficient.....	24
Tabel 2.2 Loss Coefficient untuk gradual contraction	25
Tabel 2.3 Equivalent length untuk pipa belokan 90^0	26
Tabel 2.4 Reaksi kenyamanan terhadap percepatan ISO 2631	31
Tabel 3.1 Parameter Simulasi dinamis sistem HMERSA	40
Tabel 4.1 Hasil linierisaia T_e , V , dan I	52
Tabel 5.1 Pebandingan gaya redam	64
Tabel 5.2 Perbandingan RMS pada HMERSA dan peredam konvensional	82
Tabel 5.3 Grafik transmissibility pada kereta api dengan HMERSA.....	84
Tabel 5.4 Grafik transmissibility pada kereta api dengan peredam konvensional	84

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR SIMBOL

Fd	Gaya Redam (N)
c	Konstanta Gaya redam (Ns/m)
Ms	Massa Sprung (Kg)
Mus	Massa Unsprung (Kg)
Ks	Koefisien pegas pada sprung (N/m)
Kus	Koefisien pegas pada unsprung (N/m)
Cus	Koefisien redam pada unsprung (Ns/m)
D	Diameter hidrolik shock absorber (m)
d	Diameter pipa (m)
d _{or}	Diameter orifice (m)
ρ	Massa jenis fluida kerja hidrolis SAE 10W-30 (Kg/m ³)
g	Percepatan gravitasi (m/s ²)
L	Panjang saluran pipa (m)
N	Viskositas kinematis fluida kerja (m ² /s)
η _v	Efisiensi Volumetrik
η _m	Efisiensi mekanik
q	Displacement motor hidrolik (cc/rev)
r ₁	Jari jari roda gigi 1 (m)
r ₂	Jari jari roda gigi 2 (m)
mg ₁	Massa roda gigi lurus 1 (Kg)
mg ₂	Massa roda gigi lurus 2 (Kg)
J ₁	Momen inersia roda gigi lurus 1 (Kg/m ²)
J ₂	Momen inersia roda gigi lurus 2 (Kg/m ²)
α ₁	Gradien dari voltase terhadap kecepatan
α ₁	Gradien dari voltase terhadap kecepatan
β	Konstanta arus (A/rpm)
C _{Te}	Konstanta torsi elektrik elektrik (Nm/rpm)
P ₁	Tekanan pada penampang 1 (Pa)
P ₂	Tekanan pada penampang 2 (Pa)
A ₁	Luas penampang 1 (m ²)
A ₂	Luas penampang 2 ((m ²)
H _L	Head loss

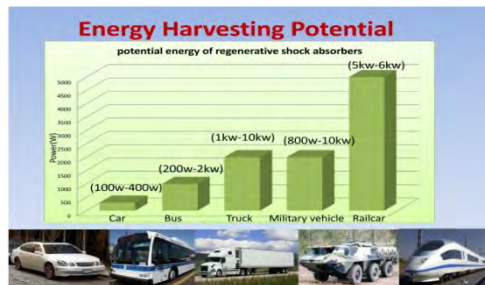
h_l	Headloss mayor
h_{lm}	Headloss minor
h	Ketingian referensi

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kereta api merupakan jenis kendaraan umum yang banyak digunakan masyarakat Indonesia. Dalam satu rangkaian kereta api umumnya terdiri dari 8 gerbong, dengan perincian 1 gerbong tenaga penggerak, 6 gerbong penumpang, dan 1 gerbong untuk kelistrikan. Kebutuhan akan bahan bakar kereta api relatif hemat yaitu sekitar 3 liter/km untuk tenaga penggerak. Untuk kebutuhan listrik seperti air conditioner (AC), dan lampu memiliki tenaga sendiri berupa genset yang memiliki tenaga sekitar 300 kVa dan 500 kVa dengan kebutuhan konsumsi bahan bakar 25-30 liter setiap jam.



Gambar 1.1 Potensi energi yang dapat dimanfaatkan pada suspensi

Dari penelitian yang oleh Lei Zuo⁽¹⁾ pada tahun 2010, kereta api merupakan kendaraan yang memiliki potensi energi harvesting terbesar daripada kendaraan lainnya (Gambar 1.1). Pada penelitian tersebut dijelaskan bahwa kereta api memiliki potensi energi sebesar 5kW- 6kW. Dalam artikel tersebut juga dijelaskan bahwa hanya 10-16% energi dari bahan bakar yang digunakan sebagai tenaga pendorong, sisanya terbuang dalam bentuk panas mesin, pembuangan panas, dan pengereman. Selanjutnya dalam penelitian Marcos Arziti⁽²⁾ pada tahun 2010

menjelaskan bahwa salah satu bagian kendaraan yang memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai penghasil listrik adalah suspensi.

Pada penelitian ini dilakukan pemodelan dan analisa pemanfaatan energi yang terbuang pada sistem suspensi kereta api menjadi energi listrik dengan menggunakan Hidrolik Magneto Electric Regenerative Shock Absorber (HMERSA) yang telah dikembangkan laboratorium vibrasi dan dinamis jurusan teknik mesin institute teknologi sepuluh nopember (ITS). Pemodelan yang dilakukan adalah dengan melakukan pemodelan $\frac{1}{2}$ bagian.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana respon dinamis dari kendaraan kereta api yang menggunakan sistem suspensi HMERSA akibat eksitasi jalan?
2. Bagaimana energy bangkitan yang dihasilkan dari kendaraan kereta api yang menggunakan sistem suspensi HMERSA akibat eksitasi profil jalan ?

1.3 Batasan Masalah

Untuk menyederhanakan permasalahan yang akan dibahas, beberapa batasan masalah yang akan diambil dalam tugas akhir ini adalah :

1. Kecepatan kereta api bernilai konstan
2. Peneliti tidak membahas tentang material bogie kereta api
3. Penelitian pada 1 bogie dengan pemodelan $\frac{1}{2}$ bagian
4. Kereta yang dimodelkan adalah kereta penumpang
5. Energi yang dianalisis hanya dipengaruhi oleh redaman pada sistem suspensi bogie
6. Bogie yang dianalisis hanya pada jenis K5 standart atau NT-11
7. Aliran fluida dianggap laminar
8. Aliran fluida incompressible flow
9. Pemodelan pada massa sprung sudah termasuk massa penumpang

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah :

1. Mengetahui respon dinamis dari kereta api yang menggunakan sistem suspensi HMERSA
2. Mengetahui energi bangkitan yang dihasilkan dari kereta api yang menggunakan sistem suspensi HMERSA

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian tugas akhir ini adalah :

1. Mengetahui hasil analisa secara dinamis dari pemodelan pergerakan kereta api
2. Mengetahui besarnya energi yang tersedia pada suspensi kereta api
3. Mengetahui cara pemasangan dan aplikasi penggunaan HMERSA pada kereta api

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan dibagi dalam beberapa bab sebagai berikut:

Bab I Pendahuluan

Bab ini berisi tentang latar belakang dari tugas akhir ini, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan tugas akhir.

Bab II Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi tentang pengenalan tentang dasar teori dan penelitian terkait yang sudah ada. Dasar teori berisi semua hal yang menunjang dalam melakukan analisa tugas akhir. Penelitian terkait berisi tentang peneitian penelitian sebelumnya dan berhubungan dengan tugas akhir

Bab III Metodologi

Bab ini berisi tentang pemodelan dan simulasi yang dilakukan pada tugas akhir .

Bab IV Analisa dan Pembahasan

Berisi tentang bentuk pemodelan dari bogie kereta api beserta hasil pengolahan data dan dilakukan analisa lebih lanjut

Bab V Penutup

Berisi tentang kesimpulan dari tugas akhir yang didapatkan dari hasil pengujian dan penelitian dan saran yang perlu diberikan

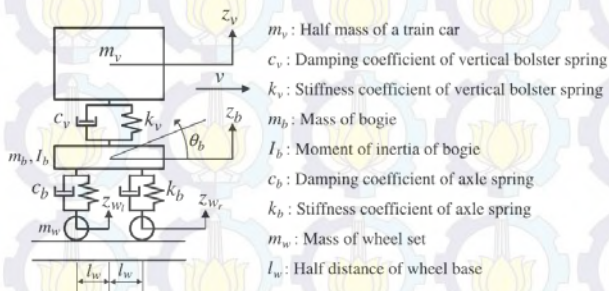
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

2.1.1 Reduksi Getaran Pada Kereta Api Cepat

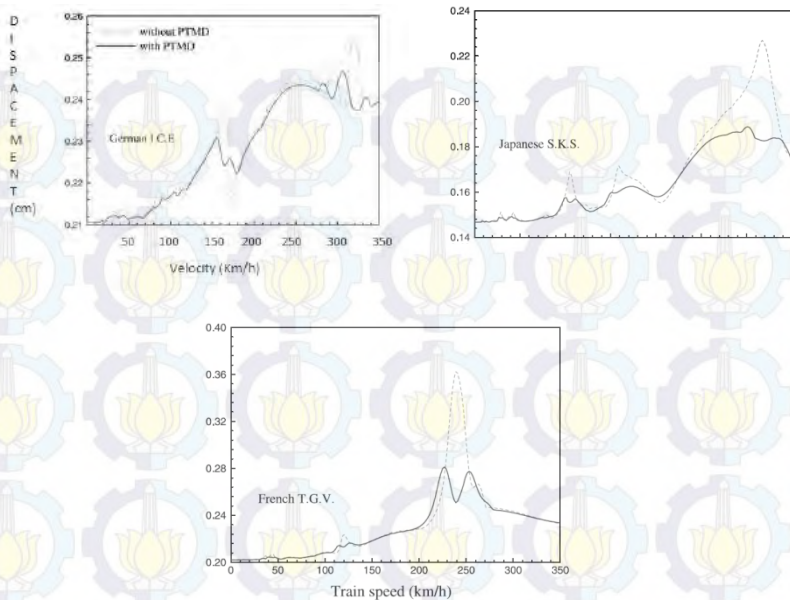
Kereta api memiliki kemampuan untuk menghasilkan energi sebesar 5KW- 6KW seperti yang terlihat pada gambar 1.1. Para peneliti telah melakukan berbagai penelitian tentang kereta api mulai dari sistem suspensi pada kereta cepat, kekuatan bogie, dan sistem dinamik pada kereta api.

Pada tahun 2002 J.F. Wang⁽³⁾ melakukan penelitian pada kereta api cepat yang tertulis dengan judul *Vibration Suppressions for high speed railway bridges using tuned mass dampers*. Dimana penelitian tersebut membandingkan pengaruh getaran sebuah kereta api pada jembatan menggunakan passive tuned mass dampers (PTMD). Kereta api yang diteliti under german I.C.E, Japanese S.K.S dan French T.G.V. dengan pemodelan kereta api setengah bagian. Pemodelan kereta api yang dilakukan adalah dengan pemodelan setengah bagian (Gambar 2.1)



Gambar 2.1 Pemodelan setengah bagian kereta api.

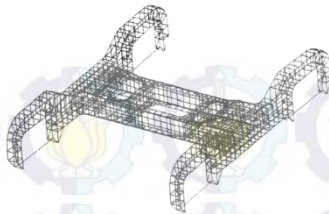
Salah satu hasil yang didapatkan adalah perbandingan pada displacement pada jembatan dengan perbandingan tanpa PTMD dan menggunakan PTMD pada masing masing kereta api (gambar 2.2)



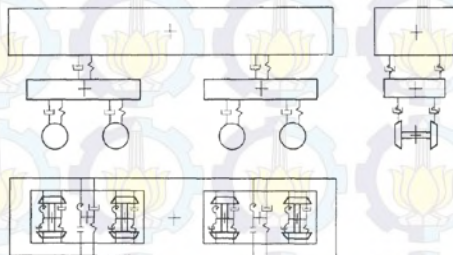
Gambar 2.2 Perbandingan displacement pada 3 jenis kereta

2.1.2 Analisa Tegangan Dinamik pada Bogie Kereta Api

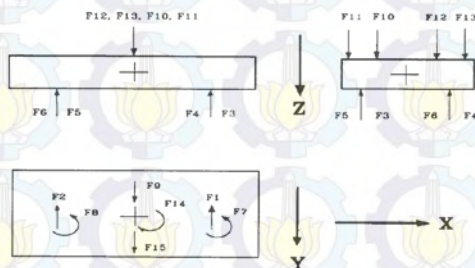
Penelitian tentang frame bogie lebih sering pada stress analysis pada sebuah frame. Pada tahun 1995 R.K Luo⁽⁴⁾ melakukan penelitian tentang tekanan pada bogie kereta api yang tertuang pada jurna dengan judul “ *Dynamic Stress Analysis of an open shaped railway bogie frame*”. Dalam jurnal tersebut R.K Luo dkk meneliti tentang profil tekanan sebuah bogie kereta api dengan raeferansi pada jalan kereta api ketika kereta api berjalan. Pemodelan yang dilakukan pada pengujian ini adalah pemodelan bentuk fisik frame (gambar 2.3), pemodelan free body diagram pada kereta (gambar 2.4), dan pemodelan gaya-gaya pada kereta api (gambar 2.5)



Gambar 2.3 Pemodelan pada frame bogie

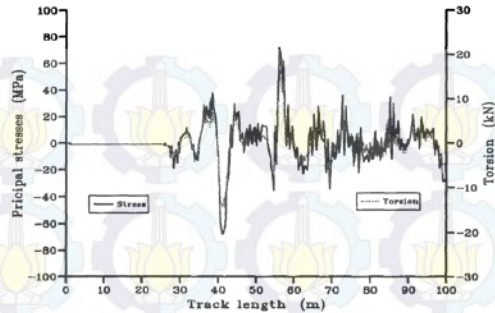


Gambar 2.4 Pemodelan Kereta Api



Gambar 2.5 Gaya-gaya pada bogie kereta api

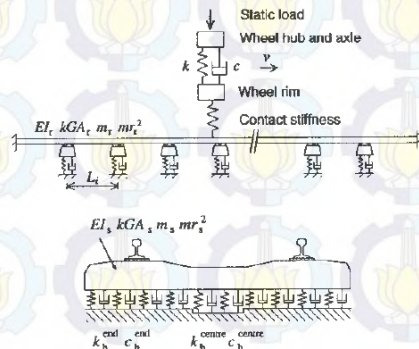
Hasil yang didapatkan dari penelitian tersebut adalah konsentrasi tekanan serta perbandingan antara tekanan dan torsi yang digambarkan pada gambar (2.6):



Gambar 2.6 Perbandingan antara Tekanan dan Beban Torsi

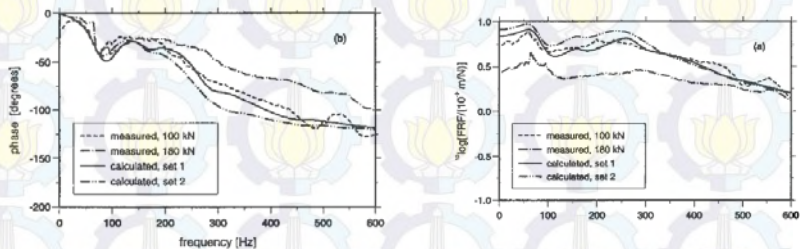
2.1.3 Pemodelan Interaksi Dinamik pada Kereta Api dan Jembatan

Penelitian tentang dpegerakan dinamis secara vertikal pada kereta api dilakukan oleh Jens C O Nielsen⁽⁵⁾ dalam jurnal yang berjudul “ *Vertical Dynamic Train/Track interaction-Verifying a Theoritical Model by Full- Scale Experiments*”. Dalam jurnal tersebut Jens C O Nielsen meneliti tentang interaksi dynamic secara vertika pada wheel dan track dengan metode eksperimen dan numerical. Pemodelan yang dilakukan antara kereta api dan jembatan terlihat pada gambar 2.7



Gambar 2.7 Pemodelan kereta api dan jembatan

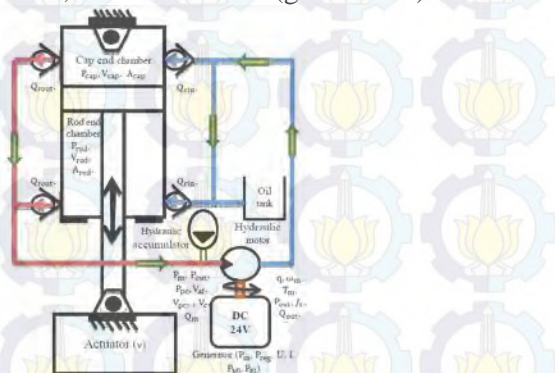
Hasil yang didapatkan dari pemodelan diatas adalah perbandingan secara matematis dan eksperimen yang tergambar pada gambar 2.8 berikut :



Gambar 2.8 Besar direct flexibility dengan beban static 100 kN dan 180 kN

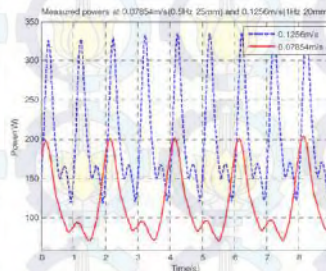
2.1.4 Regenerative Shock Absorber jenis Hidrolik

Pada tahun 2014, Ruichen Wang dkk⁽⁶⁾ melakukan penelitian dan membuat prototype tentang regenerative shock absorber (RSA). Susunan yang diibuat oleh Ruchen Wang dkk terdiri dari silinder hidrolik, motor hidrolik, akumulator, generator, pipa, oil tank, dan check valve (gambar 2.9)



Gambar 2.9 Skema dari RSA hidrolik

Pada saat pengujian, input yang diberikan berupa input sinusoidal. Ada dua variasi untuk input sinusoidal, yaitu 0,0785 m/s saat 0,5 Hz (25 mm stroke) dan 0,1256 m/s saat 1 Hz (20 mm stroke). Besar energi bangkitan yang dihasilkan dari RSA tersebut adalah 118,2 W pada saat 0,07854 m/s dan 201,7 W pada saat 0,1256 m/s. (gambar 2.10)

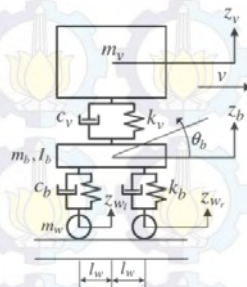


Gambar 2.10 Grafik dari energi bangkitan yang dihasilkan oleh RSA hidrolik

2.1.5 Dinamika Gerak pada Bogie dan Gerbong Kereta Api

Penelitian oleh mahasiswa ITS yang berhubungan kereta api dilakukan oleh Yohanes Dhani Kristianto. Pada tahun 2012 Yohanes Dhani⁽⁷⁾ melakukan penelitian tugas akhir yang berjudul “*Pemodelan dan Analisa Dinamika (Energi Terdisipasi) Pada Gerak Vertikal antara Suspensi Bogie dan Suspensi Gerbong Kereta Api*”. Pada penelitian tersebut sebuah kereta api dimodelkan dalam $\frac{1}{4}$ model (gambar 2.11) dan disimulasikan dengan program simulink serta dianalisis pergerakan vertikal antara bogie dan gerbong. Sedangkan analisa dilakukan untuk menurunkan rumus sebelum dibawa ke dalam program simulink untuk mengetahui respon gerak perpindahan, kecepatan dan percepatannya yang kemudian digunakan untuk menghitung berapa potensi energi yang bisa dibangkitkan.

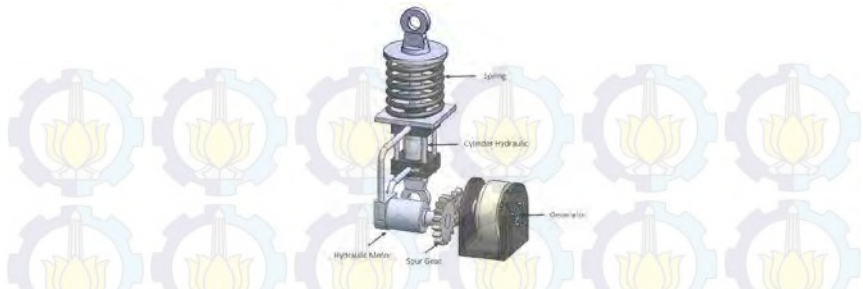
Setelah pemodelan dan analisa disimulasikan ke dalam program Simulink dihasilkan respon gerak kecepatan antara suspensi gerbong dan bogie kereta api baik pada eksitasi bump dengan amplitudo 5 cm maupun sinusoidal dengan variasi amplitudo 5 cm dan 10 cm pada variasi kecepatan 50 km/jam dan 100 km/jam. Potensi energi yang terbangkitkan terbagi menjadi dua, besar rata-rata minimal daya yang mampu terbangkitkan sebesar 48,742 watt dan besar rata-rata maksimal yang mampu terbangkitkan sebesar 4.188,037 watt.



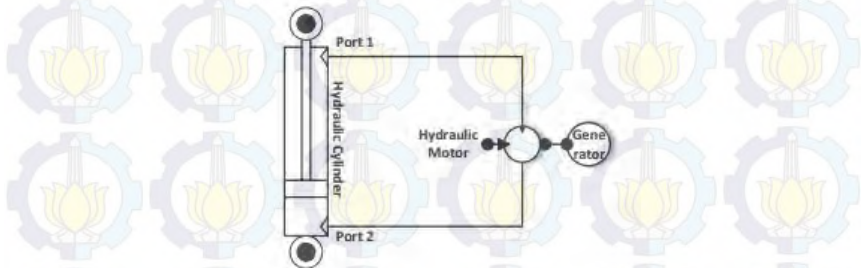
Gambar 2.11 Pemodelan 1/4 model kereta api

2.1.6 Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber

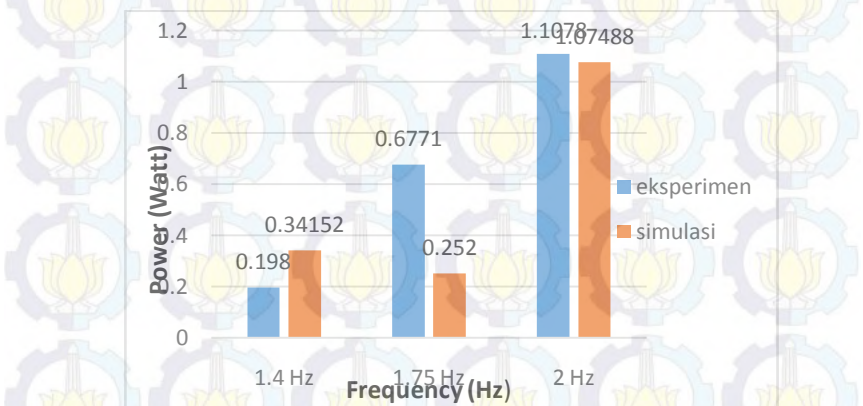
Pada tahun 2014, Kaspul Anuar⁽⁸⁾, mahasiswa Teknik Mesin ITS merancang Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber (HMRSA). Prinsip kerja HMRSA adalah memanfaatkan energi kinetik pada gerakan suspensi kendaraan. Energi tersebut ditransfer ke sebuah motor hidrolik. Gaya yang ditransfer dari motor hidrolik kemudian ditransmisikan oleh susunan roda gigi yang berfungsi untuk meningkatkan putaran generator (gambar 2.12). Putaran generator tersebut akan menghasilkan energi bangkitan. Daya yang dihasilkan HMRSA ini berkisar antara 0.024 watt sampai 1.1078 watt dengan model seperempat kendaraan (gambar 2.14)



Gambar 2.12 Konstruksi HMRSA dari Kaspul Anuar



Gambar 2.13 Prinsip Kerja HMRSA dari Kaspul Anuar



Gambar 2.14 Hasil energi bangkitan yang dihasilkan oleh HMRSA

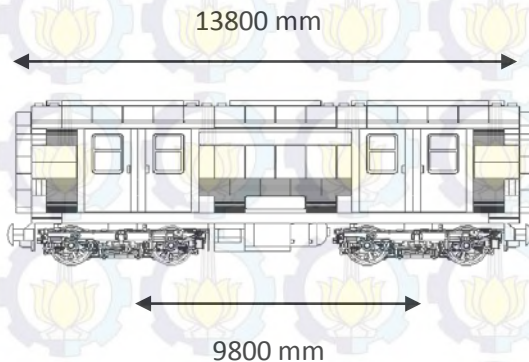
2.2 Komponen Kereta Api

2.2.1 Gerbong

Gerbong adalah kendaraan beroda yang merupakan bagian dari sebuah rangkaian kereta api yang bukan merupakan lokomotif. Gerbong secara garis besar dibedakan atas dua jenis yaitu gerbong penumpang dan gerbong barang. Gerbong barang dibedakan berdasarkan jenis muatannya antara lain :

1. Lori adalah gerbong terbuka yang umumnya untuk mengangkut bahan galian tambang.
2. Tangki : gerbong yang umumnya untuk mengangkut muatan berbentuk cair.
3. Gerbong untuk mengangkut ternak.
4. Peti kemas

Pada gerbong penumpang pada umumnya memiliki sumber energi berupa genset dengan menggunakan daya sebesar 300KVa dan 500KVa, dengan besar bahan bakar sebanyak 25-30 liter tiap jam. Ukuran panjang gerbong adalah 13800 mm dengan jarak antar pusat bogie pada satu gerbong adalah 9800 mm (gambar 2.15)



Gambar 2.15 Spesifikasi gerbong penumpang

2.2.2 Rel dan Bantalan

Rel merupakan jalur kereta api yang terdiri atas dua batang besi kaku yang sama panjang dipasang pada bantalan sebagai dasar landasan. Rel – rel tersebut diikat pada bantalan dengan menggunakan paku rel , sekrup penambat, dan penambat E. Jenis penambat tergantung dari jenis bantalan yang digunakan. Paku ulir untuk bantalan kayu, sedangkan penambat E digunakan untuk bantalan beton atau semen. Rel kereta api umumnya dipasang diatas badan jalan yang dilapis dengan batu kerikil yang berfungsi sebagai balast. Balast berfungsi untuk meredam getaran dan lenturan rel akibat beban kereta api.

Bantalan rel adalah landasan tempat rel bertumpu dan diikat dengan penambat rel untuk menahan beban kereta api. Bantalan dipasang melintang terhadap rel dengan jarak antar bantalan sepanjang 0,6 meter. Jenis bantalan rel kereta api antara lain :

1. Bantalan Kayu

Bantalan kayu merupakan bantalan yang pertama kali digunakan dalam dunia kereta api. Kelemahan bantalan kayu adalah daya tahan yang tidak terlalu lama terutama untuk daerah yang curah hujan dan kelembaban tinggi.

2. Bantalan beton

Bantalan beton terbuat dari beton bertulang prategang, pada bantalan juga sekaligus ditempatkan angker penambat. Keunggulan dari bantalan beton adalah daya tahan terhadap cuaca dibanding dengan bantalan kayu.

3. Bantalan baja

Terbuat dari pelat baja, biasanya dipasang pada lengkungan, tidak pada keseluruhan lintasan kereta api karena harganya lebih mahal dari bantalan beton.

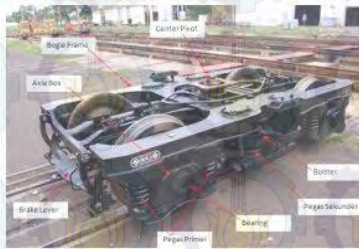
4. Bantalan Slab

Merupakan bantalan yang langsung menjadi satu dengan badan jalan yang dicor dalam bentuk slab. Biaya pembangunan bantalan slab lebih mahal, namun biaya

perawatan lebih murah. Bantalan slab umumnya digunakan pada lintasan kereta api cepat dan lintasan yang arus lalu lintas kereta apinya tinggi.

2.2.3 Bogie

Bogie merupakan bagian kereta api yang terdiri atas dua perangkat roda (*wheelset*) yang digabungkan dengan rangka dengan dilengkapi sistem pemegasan dan pengereman. Pada bogie yang banyak dipakai di Indonesia, dimana satu gerbong ditumpu oleh dua bogie, setiap bogie terdiri atas 4 roda, 8 pegas dukung, 8 pegas ayun, dan 2 absorber (gambar 2.16).



Gambar 2.16 bagian bagian bogie

Pemegasan bogie terdiri atas pemegasan sekunder dan pemegasan primer. Sistem pemegasan primer dilakukan oleh pegas dukung yang merupakan pemegasan antara perangkat roda dan rangka bogie. Fungsi pemegasan primer adalah untuk menahan kejutan dan gaya gaya impact akibat ketidakrataan rel, sambungan rel, dan gangguan laian yang berhubungan dengan roda. Pada pemegasan primer tidak terdapat absorber namun menggunakan alas pembatas gerak (gambar 2.17) yang berguna menghentikan akibat gaya *impact* yang berlebihan



Gambar 2.17 Stoper pada pegas primer

Pemegasan sekunder merupakan proses pemegasan antara gerbong kereta api dengan badan kendaraan (gerbong). Pemegasan sekunder dilakukan oleh pegas ayun. Pemegasan sekunder berperan dalam menentukan kenyamanan suatu kereta api (gambar 2.18)



Gambar 2.18 Pegas Ayun Bogie

Fungsi utama bogie adalah :

Pada umumnya bogie memiliki 3 fungsi utama yaitu meningkatkan kapasitas muat, memudahkan perjalanan melalui

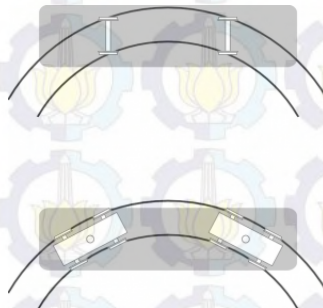
tikungan, dan meningkatkan kecepatan dan kenyamanan kendaraan.

1. Meningkatkan kapasitas muat

Suatu kereta/gerbong yang menggunakan bogie mempunyai kapasitas muat 2 kali lipat atau lebih dibandingkan dengan kereta/gerbong dua gandar. Dengan demikian daya angkutnya meningkat, yaitu jumlah penumpang untuk kereta dan tonase untuk gerbong barang.

2. Memudahkan perjalanan melalui tikungan

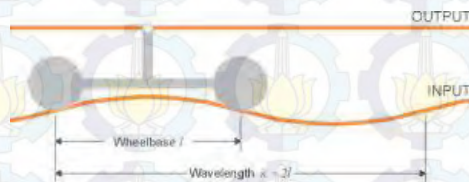
Kebutuhan angkutan penumpang memerlukan kapasitas tempat duduk yang besar pada kereta, KRL, dan KRD ; kebutuhan angkutan barang dengan volume besar serta meningkatnya daya pada lokomotif akan mengharuskan sarana tersebut dibuat lebih panjang. Dengan adanya konstruksi bogie, maka kendaraan yang panjang akan mudah pada waktu melalui tikungan, karena adanya sumbu tempat berputar antara bogie dan body, yang disebut pivot. Demikian juga pada waktu sarana melalui wesel untuk berpindah jalur bogie akan berputar terhadap body sesuai dengan radius lengkung jalan rel yang di lewati (gambar 2.19)



Gambar 2.19 Gerbong tanpa bogie (atas), gerbong dengan bogie (bawah)

3. Meningkatkan kecepatan dan kenyamanan kendaraan.

Konstruksi bogie memungkinkan pemakaian/pemasangan susunan pegas yang lebih banyak antara roda dan rangka bogie serta antara bogie dengan body (badan) kereta api. Dengan adanya pemasangan pegas yang lebih banyak maka kenyamanan akan meningkat, dengan demikian kecepatan kereta api juga dapat ditingkatkan (gambar 2.20).



Gambar 2.20 Kenyamanan pada bogie kereta

Secara umum bogie kereta api terbagi atas dua macam, yaitu bogie untuk kereta api penumpang dan bogie untuk kereta api barang. Bogie pada kereta api penumpang terdiri atas 8 jenis, yang terdiri atas :

1. Bogie Pennsylvania (K-2)
2. Bogie Cradle (K-3)
3. Bogie SIG atau NT-504 (K-4)
4. Bogie NT-11 (K-5)
5. Bogie Ferrostahl (K6)
6. Bogie Gorlitz (K-7)
7. Bogie NT-60 (K-8)
8. Bogie Bolsterless (K-9)

Bogie pada kereta barang terbagi atas 3 jenis yaitu : Bogie kepang kuda, Bogie ride control, bogie barber, dan bogie

2.3 Teori Vibrasi Suspensi Kendaraan

2.3.1. Motion of Base

Suatu waktu sistem pegas-massa-peredam mengalami gerak harmonik, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.21(a). Eksitasi input $y(t)$ menyatakan perpindahan dari *base*, dan $x(t)$ menyatakan perpindahan massa dari posisi kesetimbangan statis pada waktu t . Maka perpanjangan dari pegas adalah $(x-y)$ dan kecepatan relatif antara kedua ujung damper adalah $(\dot{x} - \dot{y})$. Dari *free body diagram* yang ditunjukkan pada gambar 2.21(b), didapatkan persamaan gerak:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \quad (2.1)$$

Jika $y(t) = Y \sin \omega t$, persamaan (2.1) menjadi:

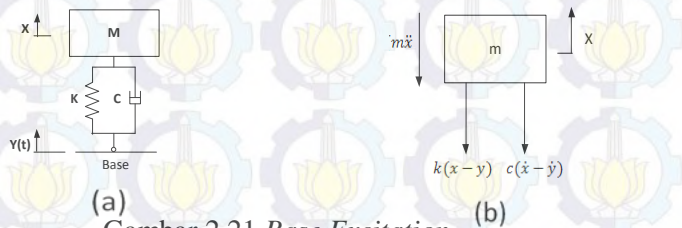
$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = ky + c\dot{y} = kY \sin \omega t + c\omega Y \cos \omega t \\ = A \sin(\omega t - \alpha)$$

Dimana $A = Y\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}$ dan $\alpha = \tan^{-1} \left[-\frac{c\omega}{k} \right]$.

Ini menunjukkan bahwa pemberian eksitasi ke *base* setara dengan memberikan gaya harmonik sebesar A ke massa. Sehingga respon steady state dari massa, $x_p(t)$, dapat dinyatakan sebagai:

$$x_p(t) = \frac{Y\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}}{[(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2]^{1/2}} \sin(\omega t - \phi_1 - \alpha) \quad (2.2)$$

Dimana $\phi_1 = \tan^{-1} \left[\frac{c\omega}{k - m\omega^2} \right]$



Gambar 2.21 Base Excitation

Menggunakan identitas trigonometri, persamaan (2.2) dapat ditulis secara lebih mudah sebagai:

$$x_p(t) = X \sin(\omega t - \phi) \quad (2.3)$$

Dimana X dan ϕ ditentukan oleh:

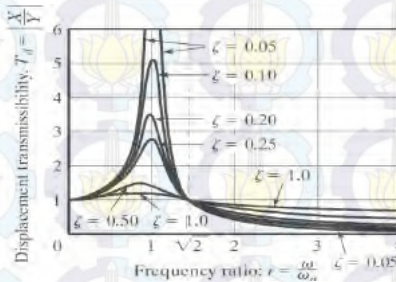
$$\frac{X}{Y} = \left[\frac{k^2 + (c\omega)^2}{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2} \right]^{1/2} \quad (2.4)$$

dan

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{mc\omega^3}{k(k - m\omega^2) + (c\omega)^2} \right] \quad (2.5)$$

Berikut adalah grafik force transmissibility yang ditunjukkan pada gambar 2.23, dimana

$$\frac{Ft}{KY} = r^2 \left[\frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2} \right]^2 \quad (2.6)$$



Gambar 2.22 Force Transmissibility

2.4 Persamaan pada Mekanisme Hidraulik

2.4.1 Persamaan Konservasi Massa

Hukum kekekalan/konservasi massa atau dikenal juga sebagai hukum Lomonosov-Lavoisier adalah suatu hukum yang menyatakan massa dari suatu sistem tertutup akan konstan meskipun terjadi berbagai macam proses di dalam sistem tersebut (dalam sistem tertutup Massa zat sebelum dan sesudah reaksi adalah sama (tetap/konstan)). Hukum kekekalan massa dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho dV + \int_{CS} \rho V dA = 0 \quad (2.7)$$

Dengan asumsi aliran pada *Control Volume shock absorber* adalah $dV = 0$, maka persamaan akan menjadi:

$$\int_{CS} \rho V dA = 0 \quad (2.8)$$

2.4.2 Persamaan Momentum Fluida

Momentum suatu partikel atau benda adalah perkalian massa (m) dengan kecepatan (v). Partikel-partikel aliran fluida mempunyai momentum. Oleh karena kecepatan aliran berubah baik dalam besarnya maupun arahnya, maka momentum partikel-partikel fluida juga akan berubah. Menurut hukum Newton II, diperlukan gaya untuk menghasilkan perubahan tersebut yang sebanding dengan besarnya kecepatan perubahan momentum. Perubahan momentum fluida setiap satuan waktu dapat ditulis dengan persamaan:

$$F_s + F_B = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} u_{xyz} \rho dV + \int_{CS} u_{xyz} \rho V dA \quad (2.9)$$

Dimana :

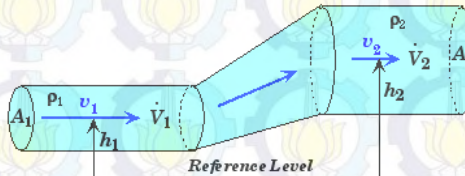
- F_s = Gaya yang diterima oleh sudu
- F_B = Gaya akibat berat fluida
- u = vektor kecepatan arah sumbu x
- V = Kecepatan fluida relatif terhadap kecepatan sudu
- ρ = Massa jenis fluida
- A = Luas aliran Fluida

2.4.3 Hukum Bernoulli

Hukum Bernoulli menyatakan bahwa tekanan dari fluida yang bergerak seperti udara berkurang ketika fluida tersebut bergerak lebih cepat. Hukum Bernoulli ditemukan oleh Daniel Bernoulli, seorang matematikawan swiss yang menemukannya pada tahun 1700. Bernoulli menggunakan dasar

matematika untuk merumuskan hukumnya. Berikut ialah rumus dasar dari hukum Bernoulli:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 + \rho_1 g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 + \rho_2 g h_2$$



Gambar 2.23 Penerapan hukum Bernoulli pada penampang

Jika losses juga diperhitungkan maka persamaan di atas menjadi:

$$\frac{P_1}{\rho} + \alpha \frac{v_1^2}{2} + gh_1 = \frac{P_2}{\rho} + \alpha \frac{v_2^2}{2} + gh_2 + h_T \quad (2.10)$$

Keterangan:

P = Tekanan (Pa)

V = Kecepatan (m/s)

ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3)

h = Ketinggian (m)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

h_T = Head loss total.

2.4.4 Hukum Pascal

Sistem hidrolik menggunakan prinsip Pascal (1653) yang menyatakan bahwa tekanan yang bekerja pada setiap bagian gas atau fluida pada ruang tertutup akan merambat kebagian lain dalam ruangan tertutup ini dengan kekuatan yang sama, secara matematis dinyatakan:

$$P = \frac{F}{A}$$

Keterangan:

P = Tekanan (Pa)

F = Gaya yang bekerja (N)

A = Luas penampang yang menerima tekanan (m²)

2.4.5. Head Loss

Head loss adalah suatu nilai untuk mengetahui seberapa besarnya reduksi tekanan total (total head) yang diakibatkan oleh fluida saat melewati sistem pengaliran. Head loss terdiri dari head loss mayor (h_l) dan headloss minor (h_{lm}). Head loss total adalah penjumlahan dari head loss mayor dan head loss minor. Head loss mayor dipengaruhi oleh *friction factor* atau gesekan fluida dengan permukaan pipa di sepanjang aliran, diameter pipa, dan kecepatan aliran. Seperti ditunjukkan dalam persamaan berikut.

$$h_l = f \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2} \quad (2.12)$$

Dimana : f : friction factor

L : panjang aliran dalam pipa (m)

D : diameter pipa (m)

V : kecepatan aliran (m/s)

Head loss minor (h_{lm}) terjadi karena adanya belokan, fitting, sambungan, kontraksi (pengecilan), dan juga enlargement (pembesaran) penampang pada pipa. Pada dasarnya, perhitungan head loss minor dapat dilakukan dengan dua cara yaitu :

$$h_{lm} = K \cdot \frac{v^2}{2} \quad (2.13)$$

Dimana K adalah *loss coefficient* yang didapatkan dari eksperimen.

$$h_{lm} = f \frac{L_e}{D} \frac{v^2}{2} \quad (2.14)$$

Dimana L_e adalah panjang ekuivalen dari pipa lurus.

Berikut ini adalah penjelasan tentang fenomena yang dapat menimbulkan headloss minor :

1. *Inlets dan Exits.*

Jika terdapat ujung tajam pada sudut inlet, maka akan terjadi separasi aliran yang menimbulkan *vena contracta*, yang menyebabkan hilangnya *mechanical energy*. Sekalipun sudut pada *inlet* maupun *exit* di buat bulat (*rounded*), tetap terjadi fenomena *vena contracta* yang kecil. Dari tabel 2.1 dapat dilihat besarnya koefisien head loss minor pada beberapa bentuk *inlet/exit*.

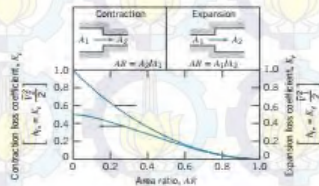
Tabel 2.1 Minor loss coefficient

Entrance Type	Minor Loss Coefficient, K_L								
Reentrant	0.78								
Square-edged	0.5								
Rounded	<table><tr><td>r/D</td><td>0.02</td><td>0.06</td><td>≥ 0.15</td></tr><tr><td>K</td><td>0.28</td><td>0.15</td><td>0.04</td></tr></table>	r/D	0.02	0.06	≥ 0.15	K	0.28	0.15	0.04
r/D	0.02	0.06	≥ 0.15						
K	0.28	0.15	0.04						

*Based on $K_L = K_L(V^2/2)$, where V is the mean velocity in the pipe.
Source: Data from Refranco [11].

2. *Enlargements dan Contractions*

Losses ini terjadi karena adanya perubahan area penampang (membesar ataupun mengecil) secara tiba – tiba. Untuk mengetahui besarnya koefisien headloss minor, dapat dilihat pada gambar 2.25.




Gambar 2.24 Grafik enlargements dan contraction loss coefficient

Losses yang diakibatkan oleh perubahan luas penampang, dapat diantisipasi dengan cara memasang nozzle maupun difuser diantara dua bagian dari pipa lurus yang terjadi luas perubahan penampang. Dari tabel 2.2 dapat ditentukan besarnya sudut dari diffuser maupun nozzle yang dibutuhkan.

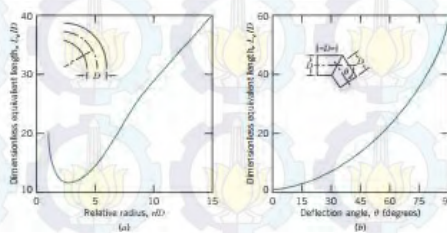
Tabel 2.2 *Loss coefficients* untuk *gradual contraction*

Loss Coefficients (K) for Gradual Contractions: Round and Rectangular Ducts

	Included Angle, θ , Degrees							
	A_2/A_1	10	15-40	50-60	90	120	150	180
	0.50	0.05	0.05	0.06	0.12	0.18	0.24	0.26
	0.25	0.05	0.04	0.07	0.17	0.27	0.35	0.41
	0.10	0.05	0.05	0.08	0.19	0.29	0.37	0.43

3. Pipe bend (belokan)

Head loss akibat bending (belokan) pada pipa mempunyai nilai yang lebih besar dari pada head loss yang terjadi pada aliran FDF (fully developed flow) pada pipa lurus pada panjang yang sama. Pada gambar 2.26 dan tabel 2.3 dapat ditentukan besar L_e/D yang digunakan untuk menghitung besarnya headloss minor yang terjadi.



Gambar 2.25 Grafik nilai *equivalent length* (L_e/D)

Tabel 2.3 *Equivalent length* untuk pipa belokan 90°

Representative Dimensionless Equivalent Lengths (L_e/D) for Valves and Fittings	
Fitting Type	Equivalent Length, ^a L_e/D
Valves (fully open)	
Gate valve	8
Globe valve	340
Angle valve	150
Ball valve	3
Lift check valve: globe lift	600
angle lift	55
Foot valve with strainer: poppet disk	420
hinged disk	75
Standard elbow: 90°	30
45°	16
Return bend, close pattern	50
Standard tee: flow through run	20
flow through branch	60

^aBased on $K_L = f(L_e/D)(V/2)$.
Source: Data from Reference [31].

Nilai friction factor dipengaruhi oleh nilai Reynold number (Re) dan kekasaran permukaan pipa (e). Dari nilai Re dapat ditentukan jenis aliran dari fluida, apabila $Re < 2300$ aliran digolongkan sebagai aliran laminar, sedangkan apabila $Re > 2300$ maka aliran digolongkan sebagai aliran turbulen. Nilai Reynold Number diperoleh dari persamaan:

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (2.15)$$

Dimana: Re : *Reynold number*
 V : kecepatan aliran fluida (m/s)
 ν : viskositas kinematik fluida (m^2/s)

Nilai friction factor dari aliran laminar diperoleh dengan menggunakan persamaan:

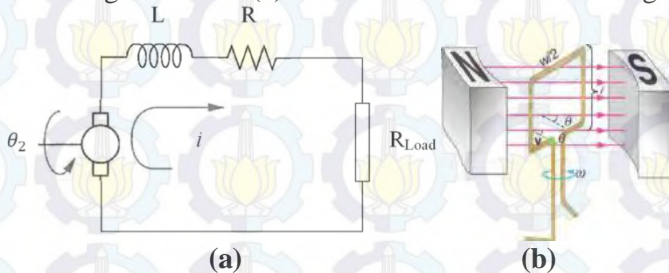
$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.16)$$

Sedangkan untuk aliran turbulen nilai friction factor diperoleh menggunakan persamaan:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log\left[\left(\frac{e/D}{3.7}\right)^{11} + \frac{6.9}{Re}\right] \quad (2.17)$$

2.5 Elektromagnetik

Elektromagnetik adalah medan magnet yang timbul disekeliling kawat penghantar yang dialiri arus listrik. Sebaliknya, perbedaan besar medan magnet di dekat kawat penghantar juga dapat menghasilkan beda potensial listrik. Besarnya medan magnet yang dihasilkan oleh arus listrik disebut induksi magnet. Pada gambar 2.26(a) akan terlihat skema elektromagnetik.



Gambar 2.26 (a) Skema elektromagnetik dan (b) skema generator listrik

Generator listrik adalah perangkat yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Generator listrik menginduksi gaya gerak listrik (GGL) atau EMF dengan memutar kumparan dalam medan magnet. Alat ini mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Sebuah generator memaksa muatan listrik mengalir melalui sirkuit eksternal listrik (gambar 2.26 b). Contoh sumber energi mekanik adalah turbin mesin uap dimana air jatuh melalui turbin air, mesin pembakaran internal, kincir angin, serta sumber energi mekanik lainnya. Generator pada hampir semua pembangkit tenaga listrik yang menyediakan sebagian besar tenaga listrik dunia.

Pertimbangan contoh yang ditunjukkan pada gambar, aliran listrik di kabel loop mengalami gaya magnet karena mereka bergerak dalam medan magnet. Listrik di kabel vertikal mengalami gaya yang sejajar dengan kawat, menyebabkan arus. Namun, kawat yang berada di bagian atas dan bawah mengalami gaya yang tegak lurus dengan kawat, sehingga

gaya ini tidak menyebabkan arus. Gaya induksi EMF dapat dihitung hanya dengan memperhitungkan kabel vertikal. EMF dapat dirumuskan menjadi $EMF = B \ell \dot{\theta}$, dimana kecepatan $\dot{\theta}$ tegak lurus terhadap medan magnet B . Disini, kecepatan adalah pada sudut θ terhadap B , sehingga komponen tegak lurus terhadap B adalah $\dot{\theta} \sin \gamma$.

Jadi dalam hal ini EMF diinduksi pada setiap sisi adalah $EMF = B \ell \dot{\theta} \sin \gamma$, dan mereka berada dalam arah yang sama. Jumlah EMF keseluruhan sekitar loop dimana N adalah jumlah lilitan kumparan

$$\varepsilon = 2NB\ell\dot{\theta}\sin\gamma R \quad (2.18)$$

Selain menghitung tegangan listrik yang dihasilkan, juga dihitung arus listrik (i) berdasarkan torsi yang memutar generator (T_e). Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$T_e = 2NB\ell i R \quad (2.19)$$

2.6 Motor Hidrolik

Motor Hidrolik merupakan sebuah aktuator mekanik yang mengonversi aliran dan tekanan hidrolik menjadi torsi atau tenaga putaran. Alat ini menjadi satu bagian dari sebuah sistem hidrolik selain hidrolik. Motor hidrolik berkebalikan fungsi dengan pompa hidrolik. Jika pompa hidrolik berfungsi untuk menghasilkan tekanan dan aliran tertentu suatu sistem hidrolik, maka motor hidrolik berfungsi mengonversi kembali tekanan hidrolik menjadi tenaga putar. Motor hidrolik dapat bekerja pada dua arah putaran motor sesuai dengan kebutuhan penggunaan. Rumus yang digunakan untuk motor hidrolik :

$$\omega = \frac{Q_m \eta_v}{q} \quad (2.20)$$

$$T_m = \Delta p_m q \eta_m \quad (2.21)$$

Dimana :

- ω : Kecepatan putaran motor hidrolik (rad/s)
- T_m : Torsi motor hidrolik (N.m)
- Q_m : debit aliran fluida yang masuk ke motor hidrolik (m³/s)
- q : perpindahan motor hidrolik (cc/rev)
- p_m : tekanan pada motor hidrolik (Pa)
- η_m : Efisiensi mekanik

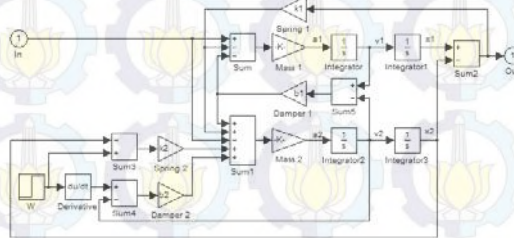
2.7 Simulink Matlab

Untuk melihat respon yang terjadi dari pergerakan sistem suspensi yang akan dianalisa ini digunakan suatu software yang memudahkan dalam analisisnya. Dalam tugas akhir ini, software yang digunakan adalah Simulink Matlab. Simulink merupakan pengembangan dari Matlab yang dapat membantu para peneliti membuat pemodelan mengenai sebuah sistem dinamis pada komputer dengan menggunakan notasi blok diagram secara cepat dan akurat.

Dahulu, pendekatan suatu model komputerisasi dari suatu sistem dinamis dimulai dengan membuat suatu blok diagram. Kemudian, dari blok diagram tersebut harus diterjemahkan dalam suatu kode bahasa pemrograman. Hal ini membuat sistem dan kontrol harus mendeskripsikannya dua kali, yang pertama dalam bentuk blok diagram dan yang kedua dalam bentuk bahasa pemrograman. Hal ini dapat memberikan resiko pada penerjemahan blok diagram pada bahasa pemrograman menjadi tidak akurat. Dengan simulink, penerjemahan menjadi kode bahasa pemrograman dihilangkan dan faktanya pada blok diagram itu sendiri mengurangi resiko ketidakakuratan dari blok diagram.

Dalam menggunakan simulink ini untuk mengetahui respon dari suspensi, digunakan blok-blok diagram yang merupakan fungsi dari persamaan yang telah dianalisa melalui sistem suspensi tersebut. Konstanta yang ada dapat disimpan melalui m-file dan pada saat blok-blok diagram akan disimulasikan, maka hanya perlu membuka m-file tersebut dan tidak usah menuliskannya pada parameter blok diagram secara

rinci. Blok diagram untuk model sistem suspensi ini bisa berupa blok-blok seperti di bawah ini.



Gambar 2.27 Contoh diagram blok Simulink untuk *quarter car model*

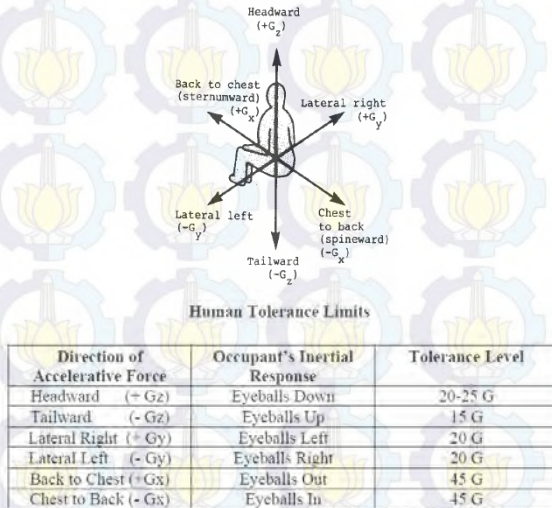
Setelah membuat blok diagram tersebut, maka akan didapatkan grafik dari displacement, kecepatan dan percepatan dari sistem RSA, sehingga nantinya akan mempermudah dalam menganalisis respon yang terjadi pada sistem suspensi kendaraan yang diamati.

2.8 Pengaruh Percepatan Kendaraan Terhadap Manusia

Gerakan utama yang dialami pengemudi selama mengemudi adalah berupa percepatan atau perlambatan dan getaran. Unit dasar yang digunakan sebagai ukuran dari percepatan yang dialami manusia adalah berbasis pada gaya gravitasi yang diringkas G . Seseorang yang jatuh bebas dimana percepatan jatuhnya adalah $9,81 \text{ m/s}^2$ dikatakan mengalami percepatan sebesar $1 G$. Toleransi manusia terhadap percepatan ditunjukkan pada gambar 2.28. Gambar tersebut menunjukkan level percepatan rata-rata untuk bermacam arah gerakan yang mampu ditahan oleh tubuh manusia

Informasi ketahanan badan manusia terhadap percepatan merupakan hal yang sangat penting sebagai referensi dalam perancangan ketahanan bodi kendaraan terhadap *impact*. Jika pada saat kendaraan mengalami *impact* dimana pengemudi atau penumpang mendapat percepatan atau perlambatan melebihi yang

mampu didukung oleh badan, maka akan dapat membahayakan pengemudi dan penumpang kendaraan tersebut.



Note: Reference: Crash Survival Design Guide, IR 79-22.
(0.10 Second time duration of crash pulse; full restraint)

Gambar 2.28 Ketahanan badan manusia terhadap percepatan linier yang dapat diterima

Untuk kriteria kenyamanan berdasarkan besar percepatan menurut standart ISO 2631, ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 2.4 Reaksi kenyamanan terhadap percepatan – ISO 2631

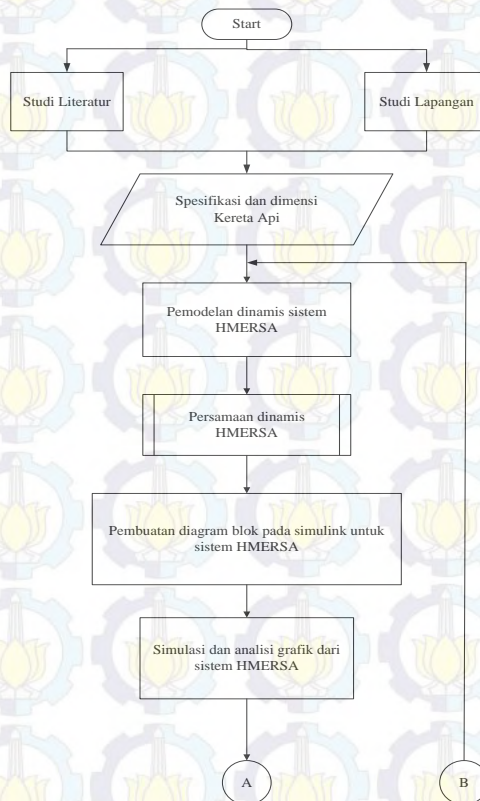
No.	Getaran	Keterangan
1	$a < 0.315 \text{ m/s}^2$	Tidak ada keluhan
2	$0.315 \text{ m/s}^2 < a < 0.63 \text{ m/s}^2$	Sedikit tidak nyaman
3	$0.5 \text{ m/s}^2 < a < 0.1 \text{ m/s}^2$	Agak tidak nyaman
4	$0.8 \text{ m/s}^2 < a < 0.16 \text{ m/s}^2$	Tidak nyaman
5	$1.25 \text{ m/s}^2 < a < 2.5 \text{ m/s}^2$	Sangat tidak nyaman
6	$a > 2 \text{ m/s}^2$	Amat sangat tidak nyaman

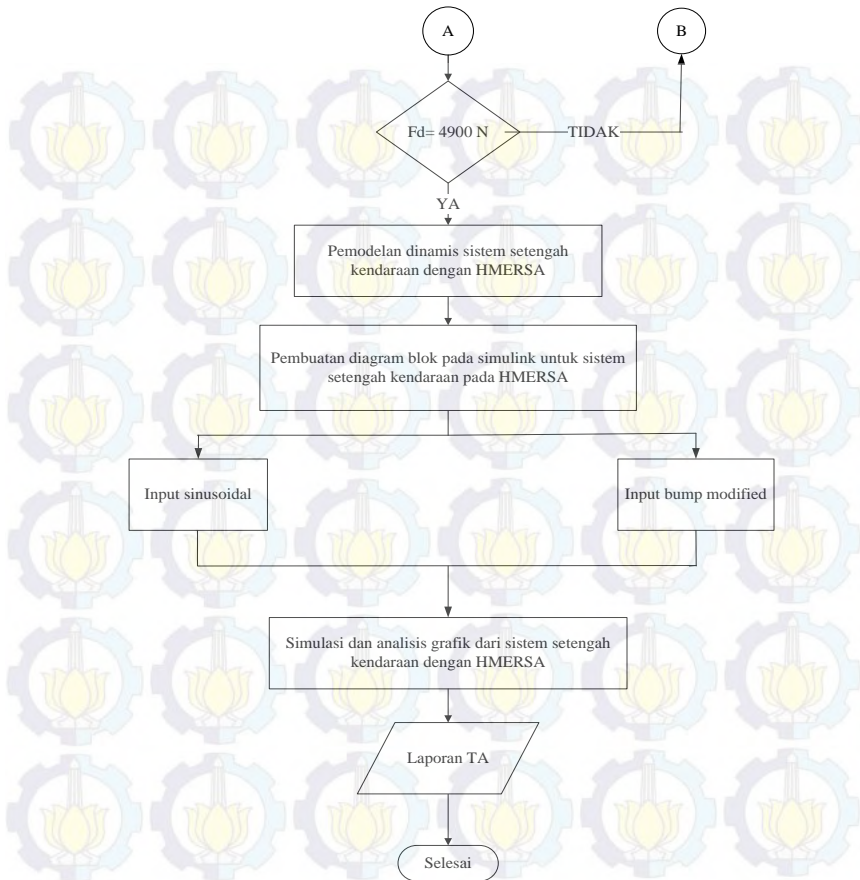


BAB III METODOLOGI

3.1 Metodologi Penelitian

Tugas akhir ini bertujuan untuk mendapatkan suatu analisa potensi energi terbangkitkan dari suspensi pegas bogie dan gerbong kereta api. Berikut ini merupakan diagram alir dalam penyelesaian tugas akhir saya :





Gambar 3.1 Diagram Alir Tugas Akhir

Pengerjaan tugas akhir secara umum dapat terlihat pada diagram alir yang terdapat pada gambar 3.1. Dimana pengerjaan tugas akhir dimulai dengan studi literature, kemudian dilakukan pemahaman terhadap HMERSA dan dilakukan pengambilan data dilapangan untuk mendapatkan nilai gaya redam (F_d), koefisien pegas, dan dimensi kendaraan. Selanjutnya dilakukan pemodelan

pada HMERSA sehingga mampu mendapat diameter dengan nilai gaya yang mendekati nilai $F_d = 4900 \text{ N}$ pada kehidupan nyata. Langkah selanjutnya melakukan pemodelan kendaraan $\frac{1}{2}$ kereta api dengan mengganti nilai $c = 49.000 \text{ Ns/m}$ yang ada dengan HMERSA lalu dihasilkan grafik dan dilakukan proses analisis dan ditarik kesimpulan.

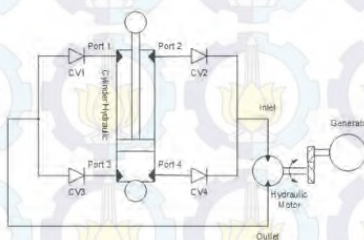
3.2 Tahap Studi Literatur

Pada tahap studi literatur ini dilakukan untuk melakukan wawasan dan pengetahuan tentang tugas akhir. Pada tahap ini juga dilakukan observasi lapangan di PT Kereta Api Indonesia (Persero) Balai Yasa Gubeng Surabaya. Observasi lapangan dilakukan untuk mendapatkan data yang dibutuhkan pada tugas akhir. Untuk penambahan literature dilakukan dengan melakukan kajian terhadap jurnal-jurnal ilmiah yang berkaitan dan penelitian sebelumnya yang berhubungan dengan tugas akhir.

3.3 Tahap Pemodelan Sistem HMERSA

3.3.1. Gambar Skema HMERSA

Pada HMERSA yang telah dibuat terdiri atas 4 buah check valve, generator, hydraulic motor, silinder hidrolik. 4 buah check valve berguna untuk menjaga aliran agar tetap searah, sehingga dapat mengurangi losses yang ditimbulkan.



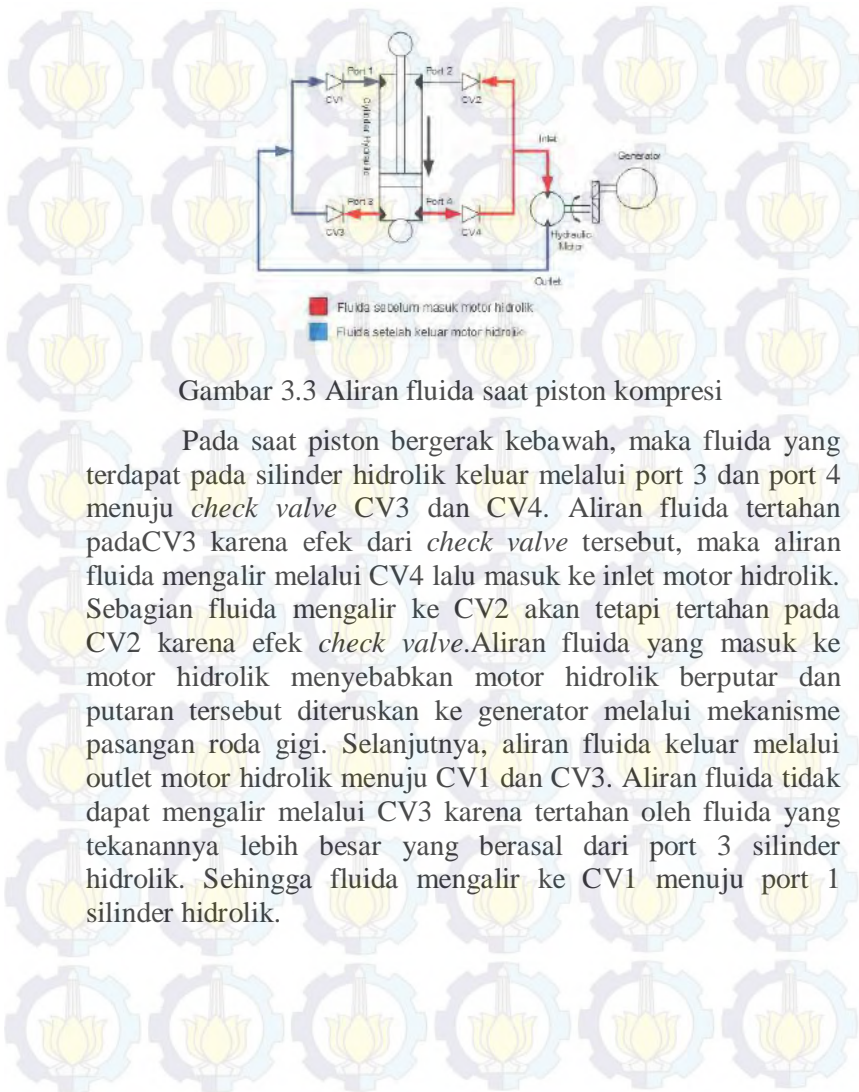
(a)



(b)

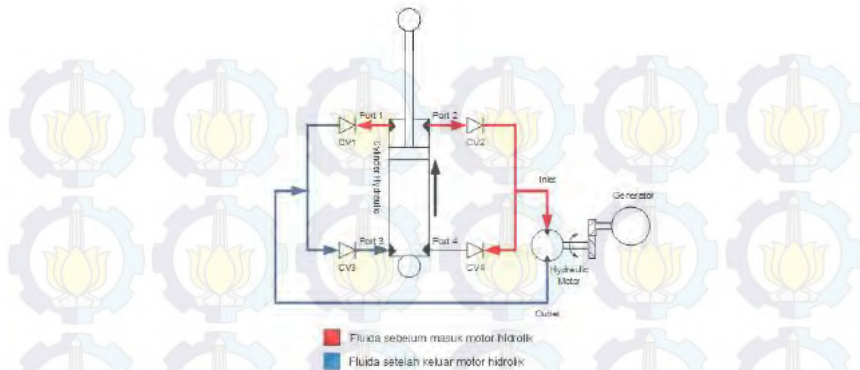
Gambar 3.2 skema HMERSA (a) bentuk fisik HMERSA (b)

3.3.2. Cara Kerja HMERSA



Gambar 3.3 Aliran fluida saat piston kompresi

Pada saat piston bergerak kebawah, maka fluida yang terdapat pada silinder hidrolik keluar melalui port 3 dan port 4 menuju *check valve* CV3 dan CV4. Aliran fluida tertahan pada CV3 karena efek dari *check valve* tersebut, maka aliran fluida mengalir melalui CV4 lalu masuk ke inlet motor hidrolik. Sebagian fluida mengalir ke CV2 akan tetapi tertahan pada CV2 karena efek *check valve*. Aliran fluida yang masuk ke motor hidrolik menyebabkan motor hidrolik berputar dan putaran tersebut diteruskan ke generator melalui mekanisme pasangan roda gigi. Selanjutnya, aliran fluida keluar melalui outlet motor hidrolik menuju CV1 dan CV3. Aliran fluida tidak dapat mengalir melalui CV3 karena tertahan oleh fluida yang tekanannya lebih besar yang berasal dari port 3 silinder hidrolik. Sehingga fluida mengalir ke CV1 menuju port 1 silinder hidrolik.

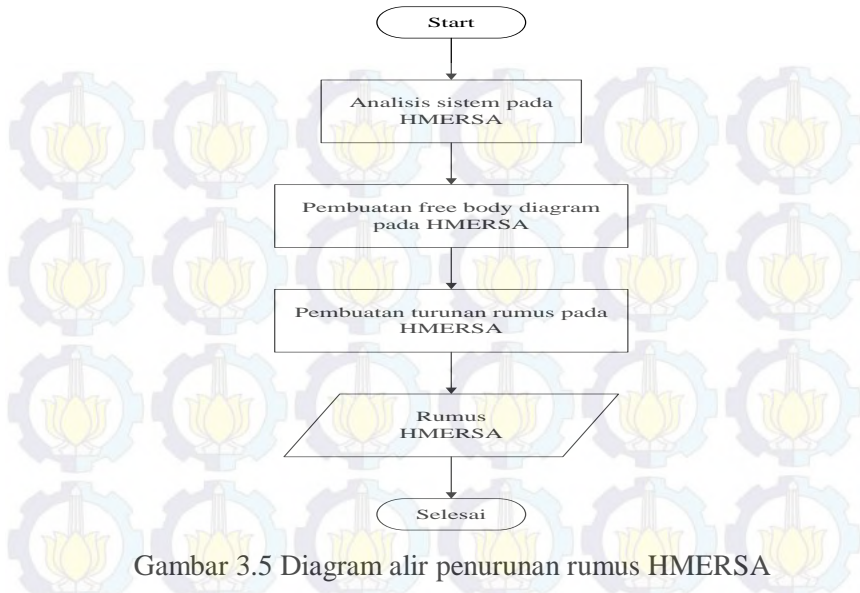


Gambar 3.4. Aliran fluida saat piston ekspansi

Pada saat piston bergerak keatas, maka fluida yang terdapat pada silinder hidrolik keluar melalui port 1 dan port 2 menuju *check valve* CV1 dan CV2. Aliran fluida tertahan pada CV1 karena efek dari *check valve* tersebut, maka aliran fluida mengalir melalui CV2 lalu masuk ke inlet motor hidrolik. Sebagian fluida mengalir ke CV4 akan tetapi tertahan pada CV4 karena efek *check valve*. Aliran fluida yang masuk ke motor hidrolik menyebabkan motor hidrolik berputar dan putaran tersebut diteruskan ke generator melalui mekanisme pasangan roda gigi. Selanjutnya, aliran fluida keluar melalui outlet motor hidrolik menuju CV1 dan CV3. Aliran fluida tidak dapat mengalir melalui CV1 karena tertahan oleh fluida yang tekanannya lebih besar yang berasal dari port 1 silinder hidrolik. Sehingga fluida mengalir ke CV3 menuju port 3 silinder hidrolik.

3.4 Penurunan Rumus HMERSA

Tahap penurunan rumus HMERSA dimulai dengan pemodelan fisik dari data yang sudah ada sebelumnya, lalu dilakukan penurunan rumus dan akan didapat persamaan gerak. Untuk lebih detail dapat dilihat pada diagram alir yang terdapat pada gambar 3.5 berikut ini :



Gambar 3.5 Diagram alir penurunan rumus HMERSA

3.5 Tahap Pemodelan Matematis Half Train

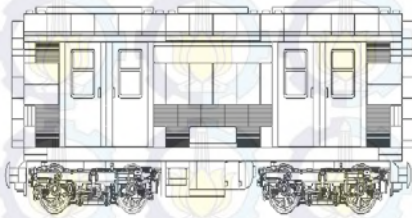
Dalam tugas akhir ini akan dianalisa respon gerak dari kereta melalui eksitasi sambungan rel dengan kecepatan tertentu. Dari respon gerak yang terjadi, lalu dicari besar potensi energi yang terdisipasi oleh shock absorber pada bogie kereta api. Sehingga perlu dilakukan pemodelan matematis dari sebuah bogie dan gerbong kereta api. Secara garis besar pada tahap ini terdapat 2 bagian yaitu tahap pemodelan free body diagram half train dan memasukkan data yang dimiliki.

Pemodelan matematis yang dilakukan dalam tugas akhir ini adalah pemodelan half train (setengah kereta), dengan panampakan dari samping. Input yang diberikan pada pemodelan kali ini adalah bump modified dan eksitasi sinusoidal. Bump modified menggambarkan sambungan antar rel, Bump modified dimaksudkan untuk adanya sambungan antar rel, sehingga menimbulkan lompatan sesaat pada roda kereta api. Sedangkan eksitasi sinusoidal menggambarkan kondisi rel yang bergelombang, karena suatu kereta api akan melewati kontur

jalanannya yang tidak rata ataupun kondisi rel yang sedikit bergelombang karena adanya pemuaian akibat kondisi cuaca.

3.5.1 Pemodelan Free body diagram

Sebelum melakukan proses simulasi pada matlab, terlebih dahulu dilakukan proses pemodelan dari sebuah kereta api. Pemodelan yang diambil adalah pemodelan half train pada sebuah gerbong kereta api. Adapun pemodelan yang dilakukan adalah sebagai berikut :

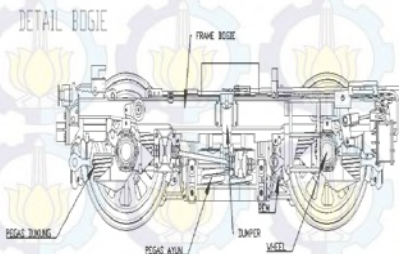


(a)



(b)

Gambar 3.6 Skema 2D gerbong (a) dan bentuk fisik gerbong (b)

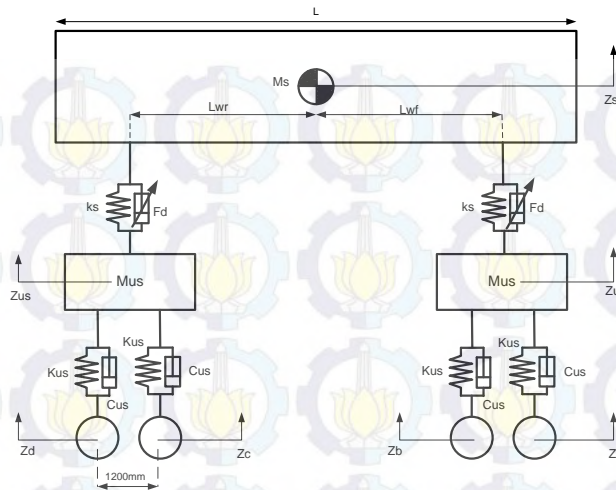


(a)



(b)

Gambar 3.7 skema 2D bogie (a) dan bentuk fisik bogie (b)



Gambar 3.8 Free body diagram half train

Gambar 3.8 merupakan gambar free body diagram dengan pemodelan half train, dengan F_d merupakan HMRSA.

3.6 Pembuatan Blok simulasi

Untuk mendapatkan hasil yang diinginkan dari pemodelan sistem, maka dibuat blok simulasi dengan bantuan software Simulink Matlab. Sebelum membuat blok diagram sistem, terlebih dahulu ditentukan parameter yang terkait dengan sistem HMRSA. Parameter yang dibutuhkan dalam pembuatan blok simulasi sistem dapat dilihat pada tabel 3.1

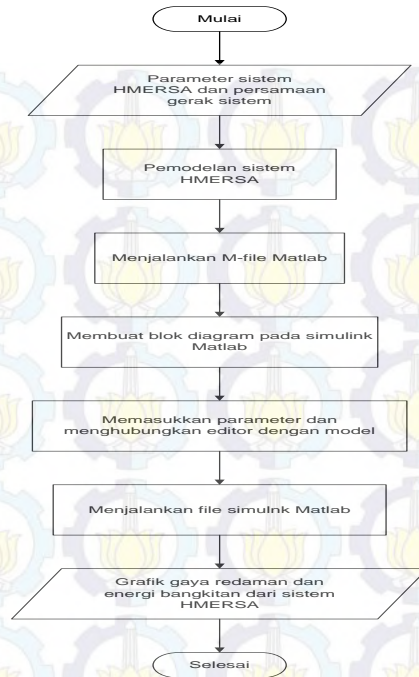
Tabel 3.1 Parameter Simulasi Dinamis Sistem HMERSA

Keterangan Komponen	Simbol	Nilai	Satuan
Parameter Komponen Hidraulis			
Diameter hydraulic shock absorber	D	0.005	m
Diameter pipa	d	0.003	m

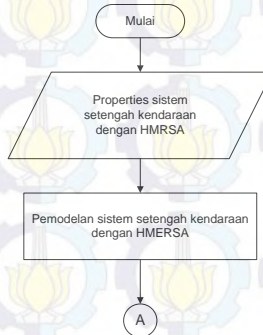
Diameter orifice	d_{or}	0.002	m
Massa Jenis fluida kerja hidraulis SAE 10W-30	ρ	860	Kg/m^3
Percepatan gravitasi bumi	g	9.81	m/s^2
Panjang total saluran pipa penyambung silinder hidraulis	L	1.75	m
Viskositas kinematis fluida kerja hidraulis SAE 10W-30	N	0.000089	m^2/s
Parameter Motor Hidrolik			
Efisiensi Volumetrik	η_v	0.88	-
Efisiensi Mekanik	η_m	0.9	-
Displacement motor hidrolik	q	0.0000082	cc/rev
Parameter Komponen Gear Mekanis			
Jari-jari roda gigi 1	r_1	0.0575	m
Jari-jari roda gigi 2	r_2	0.0225	m
Massa roda gigi lurus 1	mg_1	0.3429	Kg
Massa roda gigi lurus 2	mg_2	0.0582	Kg
Momen inersia roda gigi lurus 1	J_1	0.0005668 5	Kg.m^2
Momen inersia roda gigi lurus 2	J_2	0.0000147 3	Kg.m^2
Parameter pada generator (hasil pengujian (SOC 50%))			
Voltage	α_1	7.2603×10^{-4}	-
	BETA	-0.8152	-
	Beta	0.00442	-
	α_2	0.0061	-
	A_2	11.4822	-

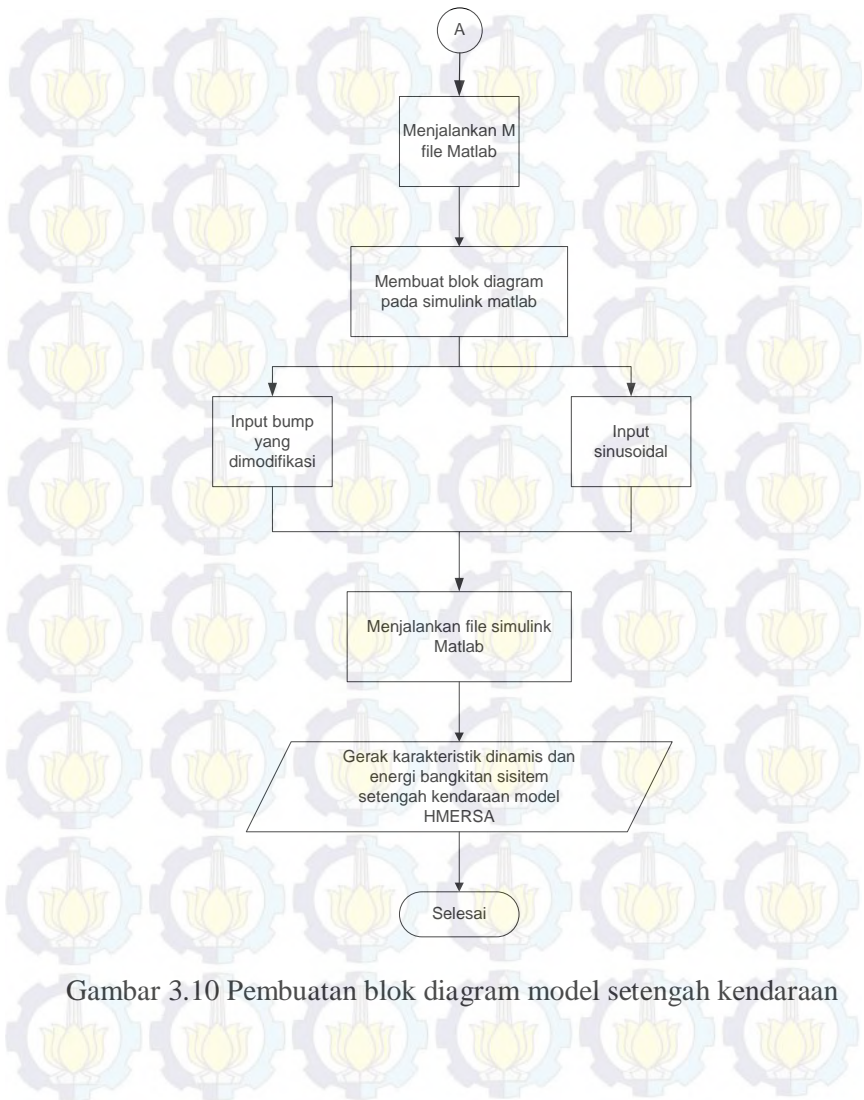
Current	Wb	0	-
	fill	1337	-
Constant Electric Torque	C_{Te}	9.142×10^{-4}	-
	CTE	0.118846	-
Parameter Model Setengah Kendaraan			
Massa bodi Kendaraan (sprung)	M_s	10000	Kg
Massa roda (unsprung)	M_{us}	1750	Kg
Konstanta pegas ayun	K_s	229075	N/m
Konstanta pegas dukung	K_{us}	91196	N/m
Konstanta dumper dukung	C_{us}	15000	Ns/m

Simulasi diagram blok sistem pada dasarnya melakukan penyelesaian persamaan gerak dari pemodelan HMERSA dengan menggunakan state variabel. Saat dilakukan simulasi, digunakan 2 variasi input, yaitu bump yang dimodifikasi dan sinusoidal (harmonik) dengan variasi frekuensi yang menggambarkan kondisi jalan tertentu. Input bump modifikasi menggambarkan kondisi sambungan antara 2 rel kereta api, sedangkan input sinusoidal menggambarkan kondisi rel kereta api yang tidak rata misalnya adanya perubahan bentuk karena pemuaian pada kereta api. Diagram alir blok sistem dapat dilihat gambar 3.9 berikut yang dimulai dengan parameter HMERSA yang sudah dimiliki sebelumnya misalnya konstanta peredam (C), Gaya redam (Fd), kemudian dilakukan proses pemodelan HMERSA pada simulink dan dijalankan dengan frekuensi yang sudah didapatkan dari data lapangan, sehingga akan dihasilkan grafik gaya redam terhadap kecepatan dan gaya redam terhadap perpindahan.



Gambar 3.9 Diagram alir pembuatan blok simulasi sistem HMERSA





Gambar 3.10 Pembuatan blok diagram model setengah kendaraan

3.7 Analisa Hasil

Dari pembuatan blok simulais pada simulink matlab, didapatkan data berupa grafik karakteristi dinamis serta besar daya energy bangkitan oleh generator pada sistem setengah kendaraan dengan HMERSA dan grafik gaya redam dan energy bangkitan pada HMERSA

Dari grafik, performa suspensi dianalisis dan dievaluasi. Kemudian dari analisis performa suspensi tersebut akan ditarik kesimpulan. Kesimpulan yang dicari meliputi berapa besar energi listrik bangkitan yang dapat dihasilkan pada pasangan diameter dan keadaan input, serta respon dinamis bodi sistem HMERSA terhadap simulasi input yang ditentukan.



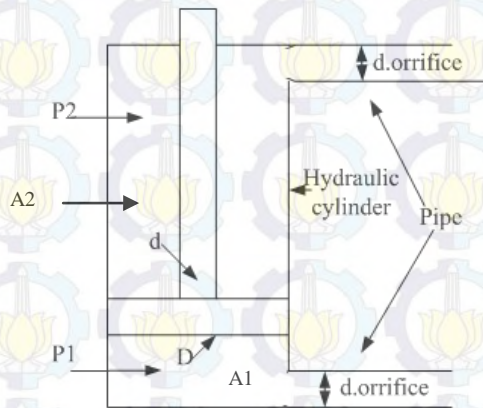
BAB IV PEMODELAN SISTEM

4.1 Pemodelan Dinamis Sistem HMERSA

Untuk sistem HMERSA ini menggunakan mekanisme hidrolik yang dihubungkan dengan motor hidrolik. Selanjutnya motor hidrolik dihubungkan ke pasangan spur gear dan dilanjutkan pada generator.

4.1.1 Skema Sistem Hidrolik

Gambar skema HMERSA telah digambarkan pada gambar 3.2. Berikut adalah bagian spesifik silinder hidrolik yang digambarkan pada gambar 4.1



Gambar 4.1 Silinder hidrolik pada HMERSA

Persamaan yang digunakan pada sistem HMERSA (Hydro-Magneto Electric Regenerative Shock Absorber) sebagai berikut :

Untuk persamaan silinder hidrolik, menggunakan persamaan Bernoulli adalah sebagai berikut :

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gh_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gh_2 + H_L \quad (4.1)$$

a. Perhitungan Headloss

Antara kedua silinder hidrolis terdapat saluran orifice yang dilalui oleh fluida kerja. Adanya orifice ini menyebabkan head loss (H_L). Total head loss terdiri atas 2 jenis yaitu headloss mayor (h_1) yang disebabkan oleh gesekan anatar fluida dengan permukaan dalam orrifice, sedangkan headloss minor (h_{lm}) disebabkan oleh adanya perubahan bentuk pada orrifice

$$H_L = h_1 + h_{lm}$$

$$H_L = f \frac{L}{D} \frac{\dot{x}_{or}^2}{2} + K \frac{\dot{x}_{or}^2}{2}$$

Dengan $f = \frac{64}{Re}$ dan $Re = \frac{\dot{x} D}{\nu}$, maka :

$$H_L = \frac{32 L \nu}{dtube^2} \dot{x}_{or} + K \frac{\dot{x}_{or}^2}{2} \quad (4.2)$$

b. Perhitungan silinder hidrolik dengan orrifice dengan persamaan konservasi massa Perhitungan Saat Kompresi :

$$Q_{komp} = Q_{orrifice}$$

$$A_1 \cdot \dot{x}_1 = A_{or} \cdot \dot{x}_{or}$$

$$\dot{x}_{or} = \frac{A_1}{A_{or}} \cdot \dot{x}_1 \quad (4.3)$$

$$\text{Dimana } A_1 = \frac{\pi}{4} D^2$$

Kemudian dilakukan perhitungan pada kondisi kompresi dengan menggunakan persamaan bernoulli

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{\dot{x}_1^2}{2} + gh_1 = \frac{P_{or}}{\rho} + \frac{\dot{x}_{or}^2}{2} + gh_{or} + H_L$$

Karena $h_1 = h_{or}$, maka :

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{\dot{x}_1^2}{2} = \frac{P_{or}}{\rho} + \frac{\dot{x}_{or}^2}{2} + H_L$$

$$\frac{P_1}{\rho} - \frac{P_{or}}{\rho} = \frac{\dot{x}_{or}^2}{2} - \frac{\dot{x}_1^2}{2} + H_L$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{1}{2} (\dot{x}_{or}^2 - \dot{x}_1^2) + H_L \quad (4.4)$$

Lalu dilakukan substitusi dari persamaan 4.3 ke persamaan 4.4

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{A_1}{A_{or}} \cdot \dot{x}_1 \right)^2 - \dot{x}_1^2 \right) + H_L$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{1}{2} \left(\frac{\dot{x}_1^2 A_1^2}{A_{or}^2} - \dot{x}_1^2 \right) + H_L$$

$$\Delta P = \frac{\rho}{2} \dot{x}_1^2 \left(\frac{A_1^2}{A_{or}^2} - 1 \right) + H_L \quad (4.5)$$

Substitusikan persamaan 4.2 ke persamaan 4.5

$$\Delta P = \frac{\rho}{2} \dot{x}_1^2 \left(\frac{A_1^2}{A_{or}^2} - 1 \right) + \frac{32 L v}{dtube^2} \dot{x}_{or} + K \frac{\dot{x}_{or}^2}{2}$$

$$F = \Delta P \times A_1 \\ = \left[\frac{\rho}{2} \dot{x}_1^2 \left(\frac{A_1^2}{A_{or}^2} - 1 \right) + \frac{32 L v}{dtube^2} \dot{x}_{or} + K \frac{\dot{x}_{or}^2}{2} \right] \cdot A_1 \quad (4.6)$$

Perhitungan Saat Ekspansi :

$$Q_{eks} = Q_{orifice}$$

$$A_2 \cdot \dot{x}_2 = A_{or} \cdot \dot{x}_{or}$$

$$\dot{x}_{or} = \frac{A_2}{A_{or}} \cdot \dot{x}_2$$

$$\text{Dimana } A_2 = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$$

Penghitungan perubahan tekanan pada silinder saat kondisi ekspansi dengan menggunakan persamaan Bernoulli

$$\frac{P_2}{\rho} + \frac{\dot{x}_2^2}{2} + gh_2 = \frac{P_{or}}{\rho} + \frac{\dot{x}_{or}^2}{2} + gh_{or} + H_L$$

Karena $h_2 = h_{or}$, maka :

$$\frac{P_2}{\rho} + \frac{\dot{x}_2^2}{2} = \frac{P_{or}}{\rho} + \frac{\dot{x}_{or}^2}{2} + H_L$$

$$\frac{P_2}{\rho} - \frac{P_{or}}{\rho} = \frac{\dot{x}_{or}^2}{2} - \frac{\dot{x}_2^2}{2} + H_L$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{1}{2} (\dot{x}_{or}^2 - \dot{x}_2^2) + H_L \quad (4.7)$$

Substitusi persamaan 4.6 ke persamaan 4.7

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{A_2}{A_{or}} \cdot \dot{x}_2 \right)^2 - \dot{x}_2^2 \right) + H_L$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{1}{2} \left(\frac{\dot{x}_2^2 A_2^2}{A_{or}^2} - \dot{x}_2^2 \right) + H_L$$

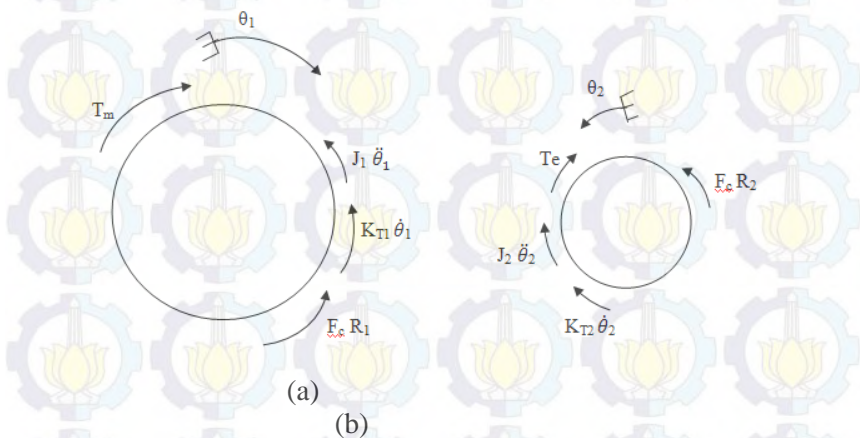
$$\Delta P = \frac{\rho}{2} \dot{x}_2^2 \left(\frac{A_2^2}{A_{or}^2} - 1 \right) + H_L \quad (4.8)$$

Lalu lakukan substitusi dari persamaan 4.2 ke persamaan 4.8

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{\rho}{2} \dot{x}_2^2 \left(\frac{A_2^2}{A_{or}^2} - 1 \right) + \frac{32 L v}{dtube^2} \dot{x}_{or} + K \frac{\dot{x}_{or}^2}{2} \\ F &= \Delta P \times A_2 \\ &= \left[\frac{\rho}{2} \dot{x}_2^2 \left(\frac{A_2^2}{A_{or}^2} - 1 \right) + \frac{32 L v}{dtube^2} \dot{x}_{or} + K \frac{\dot{x}_{or}^2}{2} \right] \cdot A_2 \end{aligned}$$

4.1.2 Motor hidrolik, Gear, dan Torsi Elektrik pada Generator

Dari model fisik pada gambar 4.2 didapatkan free body diagram (FBD) pada gambar 4.2



Gambar 4.2 FBD 1 (a) dan FBD 2 (b) pada pasangan gear

Dari gambar 4.2 akan didapatkan persamaan matematis dari FBD 1 dan FBD 2, berikut persamaan untuk FBD 1 :

$$J_1 \ddot{\theta}_1 + K_{T1} \theta_1 + F_c R_1 = T_m$$

Karena sangat rigid $K_{T1} \theta_1 = 0$

Maka :

$$J_1 \ddot{\theta}_1 + F_c R_1 = T_m \quad (4.9)$$

Dari FBD 2 :

$$J_2 \ddot{\theta}_2 + K_{T2} \dot{\theta}_2 + T_e = F_c R_2$$

Karena rigid, maka $K_{T2} \dot{\theta}_2 = 0$

$$F_c = \frac{J_2 \ddot{\theta}_2 + T_e}{R_2} \quad (4.10)$$

Substitusi persamaan 4.10 ke persamaan 4.9

$$J_1 \ddot{\theta}_1 + \left(\frac{J_2 + T_e}{R_2} \right) R_1 = T_m$$

Maka :

$$T_m = J_1 \ddot{\theta}_1 + \frac{R_1}{R_2} (J_2 \ddot{\theta}_2 + T_e) \quad (4.11)$$

Dimana :

$$\frac{R_1}{R_2} = N$$

$$\theta_2 = \frac{R_1}{R_2} \theta_1$$

$$\dot{\theta}_2 = \frac{R_1}{R_2} \dot{\theta}_1$$

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{R_1}{R_2} \ddot{\theta}_1$$

Maka persamaan 4.11 menjadi :

$$T_m = J_1 \ddot{\theta}_1 + N (J_2 N \ddot{\theta}_1 + T_e)$$

$$T_m = J_1 \ddot{\theta}_1 + J_2 N^2 \ddot{\theta}_1 + T_e \cdot N$$

$$T_m = (J_1 + J_2 \cdot N^2) \ddot{\theta}_1 + T_e \cdot N \quad (4.12)$$

Persamaan pada silinder hidrolik

$$\omega = \frac{Q_m \eta_v}{q}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\eta_v}{q} \frac{dQ_m}{dt}$$

$$\dot{\omega} = \frac{\eta_v}{q} \dot{Q}_m = \frac{\eta_v}{q} A \ddot{x} \quad (4.13)$$

dimana $\ddot{\theta} = \dot{\omega}$, dilakukan substitusi dari persamaan 4.13 ke persamaan 4.12 :

$$T_m = (J_1 + J_2 N^2) \frac{\eta_v}{q} A \ddot{x} + T_e \cdot N \quad (4.14)$$

Dengan :

$$T_m = \Delta p m \cdot q \cdot \eta m \quad (4.15)$$

Kemudian dilakukan substitusi dari persamaan 4.15 ke persamaan 4.14

$$\Delta p m \cdot q \cdot \eta m = (J_1 + J_2 N^2) \frac{\eta_v}{q} A \ddot{x} + T_e \cdot N$$

$$\Delta p m = \frac{1}{q \cdot \eta m} \left[\left(\frac{\eta_v}{q} A (J_1 + J_2 N^2) \ddot{x}(t) \right) + T_e \cdot N \right] \quad (4.16)$$

Dari eksperimen sebelumnya, tentang linierisasi torsi elektrik, didapatkan persamaan

$$T_e = C_{te} \cdot \omega + \varepsilon \quad (4.17)$$

Substitusi persamaan 4.17 ke 4.16

$$\Delta p m = \frac{1}{q \cdot \eta m} \left[\left(\frac{\eta_v}{q} A_{\text{relatif}} (J_1 + J_2 N^2) \ddot{x}(t) \right) + (C_{te} \cdot \omega + \varepsilon) N \right]$$

A_{relatif} merupakan A saat ekspansi dan kompresi. Saat kondisi ekspansi, $A_{\text{relatif}} = A_1$ dan saat kompresi $A_{\text{relatif}} = A_2$

4.1.3 Persamaan Generator yang telah dilinearkan (untuk T_e , V , dan I)

Dari penelitian yang telah dilakukan oleh Skriptyan, mahasiswa S2 Teknik Mesin ITS, didapatkan tabel 4.1 sebagai berikut :

Tabel 4.1 Tabel hasil linierisasi untuk T_e , V dan I

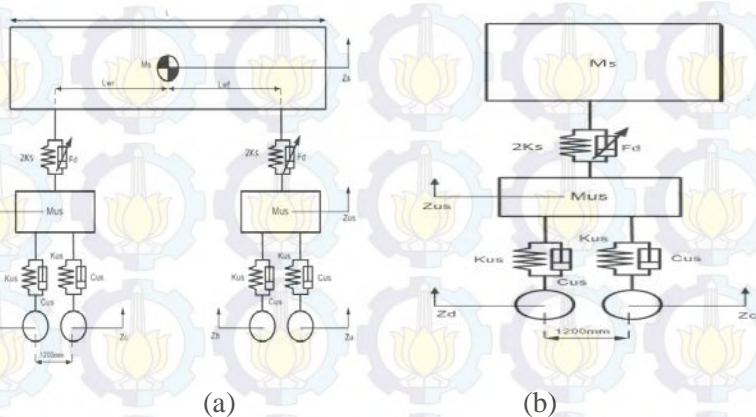
SOC (%)	Voltage			
	$0 \leq \omega_1 \leq 130$		$\omega_2 > 130$	
	α_1	A_1	α_2	A_2
25	0.174249	-10.4598	0.0036	11.802
50			0.0061	11.4822
75			0.0033	11.841

100			0.0041	11.7422
SOC (%)	Arus		Torsi elektrik	
	$\omega > 130$		$\omega > 130$	
	β	B	CT_e	ϵ
25	0.003476	-0.57005	$7.25 \cdot 10^{-4}$	0.0943
50	0.003956	-0.64816	$9.14 \cdot 10^{-4}$	0.11885
75	0.004359	-0.73821	$9.16 \cdot 10^{-4}$	0.11911
100	0.003689	-0.61679	$7.98 \cdot 10^{-4}$	0.10374

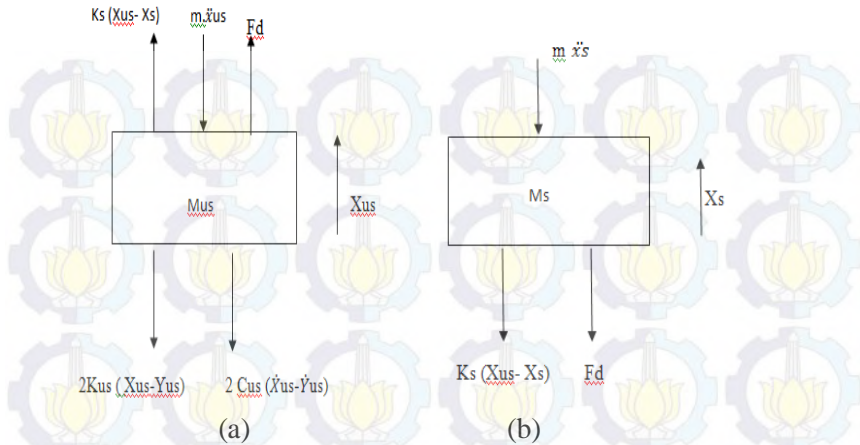
Dari tabel 4.1 dilakukan pemilihan berdasarkan SOC dan diambil keputusan untuk menggunakan parameter hasil linierisasi dengan menggunakan SOC sebesar 50 %.

4.2 Pemodelan Dinamis Seperempat Kendaraan dengan Penambahan HMERSA

Dari model matematis yang telah dijelaskan pada gambar FBD sebagai berikut :



Gambar 4.3 pemodelan setengah kendaraan (a) dan seperempat kendaraan (b)



Gambar 4.4 Pemodelan free bodi diagram massa unsprung (a) dan massa unsprung(b)

Dari FBD massa unsprung (a) :

$$\sum F = 0$$

$$2K_{us}(x_{us} - y_{us}) + 2C_{us}(\dot{x}_{us} - \dot{y}_{us}) + m_{us}\ddot{x}_{us} - 2K_s(x_{us} - x_s) - F_d = 0$$

$$\ddot{x}_{us} = \frac{1}{m_{us}} [-2K_{us}(x_{us} - y_{us}) - 2C_{us}(\dot{x}_{us} - \dot{y}_{us}) + 2K_s(x_{us} - x_s) + F_d]$$

Persamaan state variable

$$\dot{x} = v$$

$$\ddot{x}_{us} = \frac{1}{m_{us}} [-2K_{us}(x_{us} - y_{us}) - 2C_{us}(\dot{x}_{us} - \dot{y}_{us}) + 2K_s(x_{us} - x_s) + F_d]$$

Dari FBD persamaan massa unsprung (b) :

$$\sum F = 0$$

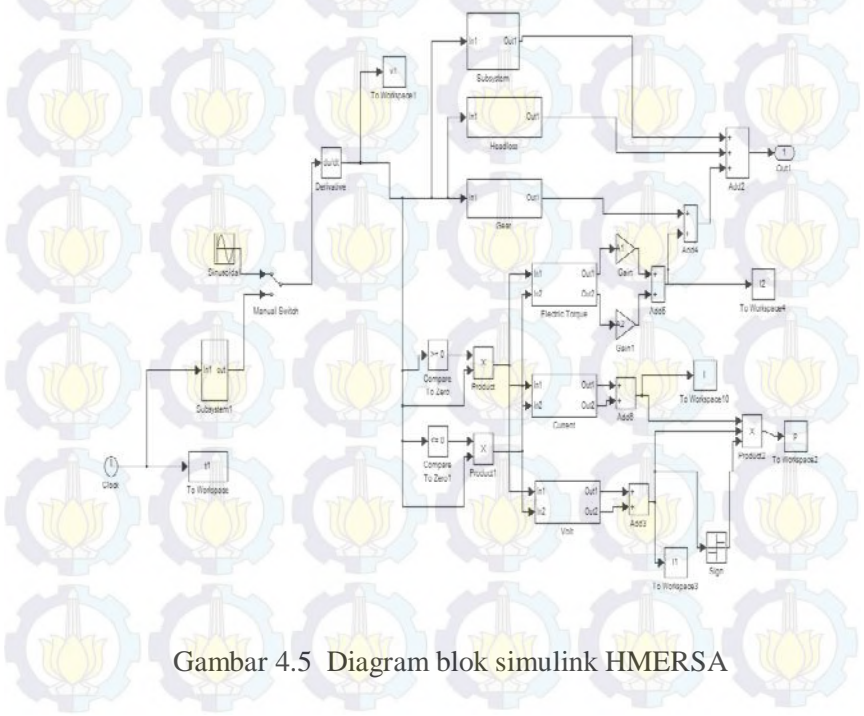
$$-K_s(x_{us} - x_s) - F_d - m_s\ddot{x}_s = 0$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{v}$$

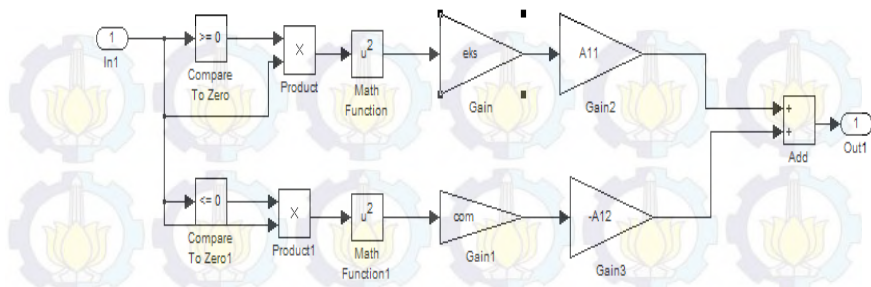
$$\ddot{x}_s = \frac{l}{m_s} (-2Ks (x_{us} - x_s) - F_d)$$

4.3.1 Diagram blok HMERSA

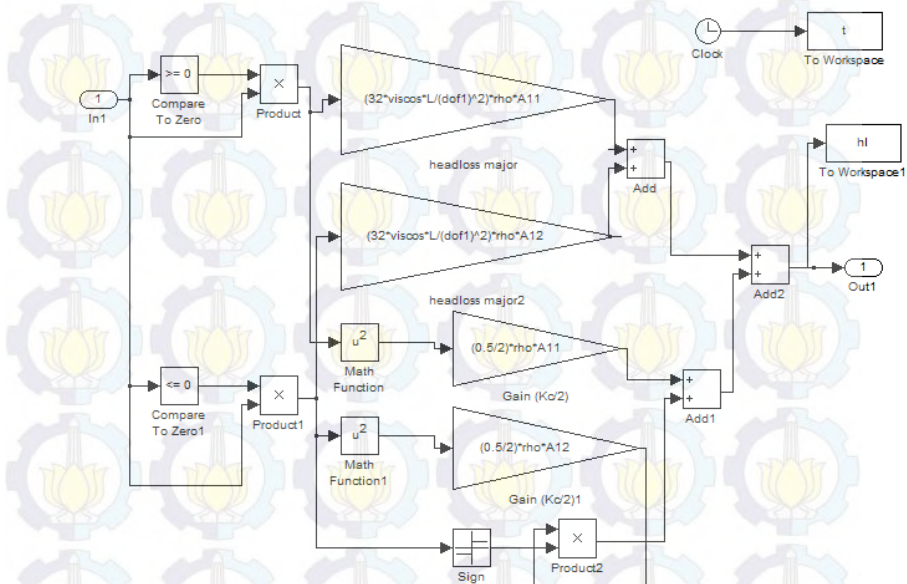
Pada pengujian awal pada tugas akhir ini akan dilakukan simulasi pada HMERSA dengan input sinusoidal dengan frekuensi yang sudah didapatkan dari pengambilan data di lapangan yaitu 0.455 Hz, 0.909 Hz, dan 1.364 Hz dengan diagram blok yang ditunjukkan pada gambar 4.5



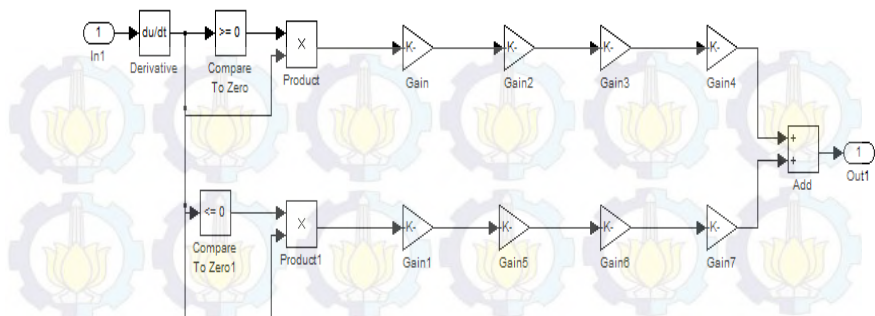
Gambar 4.5 Diagram blok simulink HMERSA



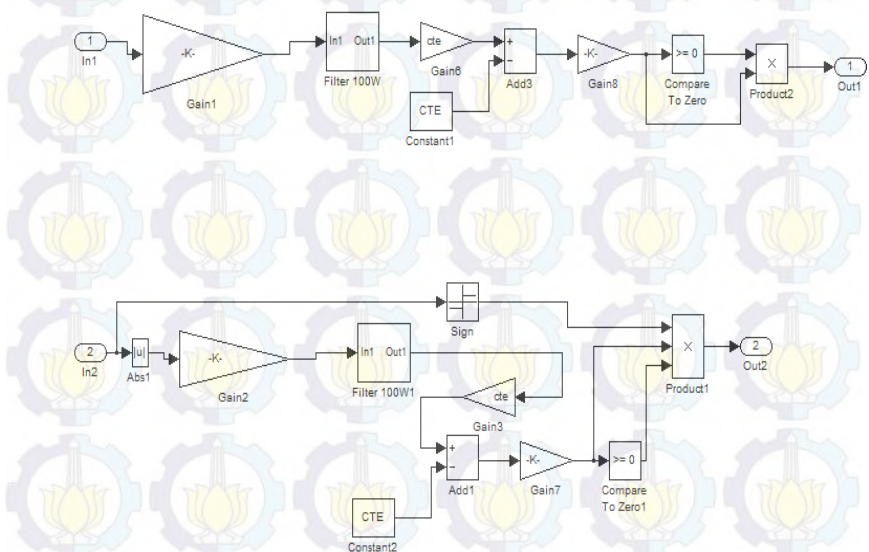
Gambar 4.6 Diagram blok simulink silinder hidrolis



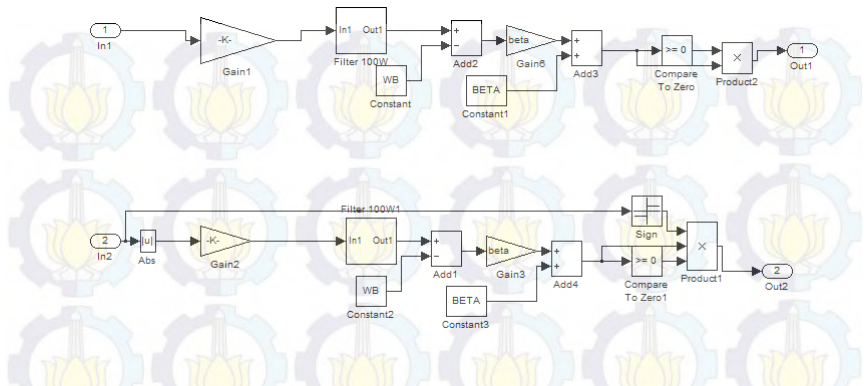
Gambar 4.7 Diagram blok simulink headloss total



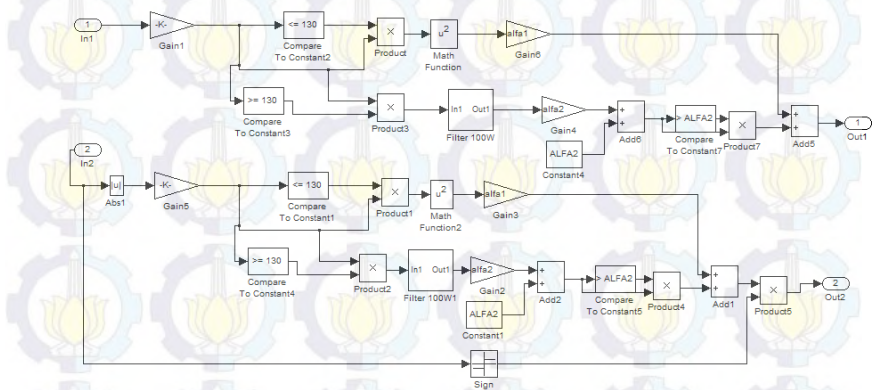
Gambar 4.8 Diagram blok simulink spur gear



Gambar 4.9 Diagram blok simulink torsi elektrik



Gambar 4.10 Diagram blok simulink arus listrik



Gambar 4.11 Diagram blok simulink Tegangan Listrik

4.3.2 Diagram blok sistem seperempat kendaraan dengan penambahan HMERSA

4.3.2.1 Profil Jalan pada Pengujian Seperempat Kendaraan

Simulasi yang dilakukan pada sistem suspensi seperempat kendaraan (*quarter car model*) dengan HMRSA ini menggunakan dua jenis input, yaitu input bump yang

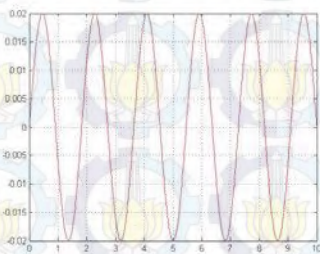
dimodifikasi dan input sinusoidal/harmonik variasi kecepatan kendaraan

1. Input Sinusoidal

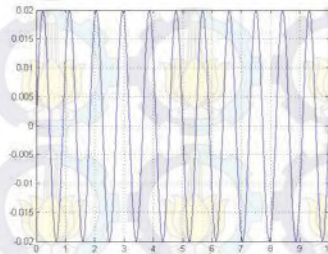
Kecepatan yang digunakan pada simulasi ini merepresentasikan kecepatan rendah (20 km/jam), sedang (40 km/jam), dan tinggi (60 km/jam). Untuk perhitungan frekuensi (ω) input sinusoidal digunakan rumus:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (4.19)$$

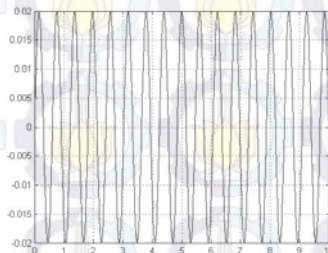
Dari perhitungan menggunakan persamaan 4.19 frekuensi pada kecepatan kendaraan 20 km/h adalah 0.55 Hz, kecepatan kendaraan 40 km/jam adalah 1.11 Hz, dan pada kecepatan kendaraan 60 km/jam adalah 1.67 Hz.



(a)



(b)



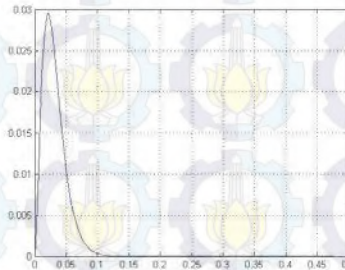
(c)

Gambar 4.12 Profil jalan Sinusoidal untuk input 20 km/jam (a), 40 km/jam (b), dan 60 km/jam (c)

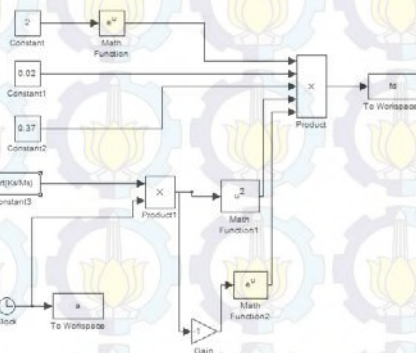
2. Input bump yang dimodifikasi

Sedangkan pada input bump yang dimodifikasi digunakan persamaan :

$$Z_r(t) = Z_{\max} 0.37 e^2 (\gamma \omega_0 t) e^{-\gamma \omega_0 t}$$



Gambar 4.13 Profil jalan dengan input bump yang dimodifikasi

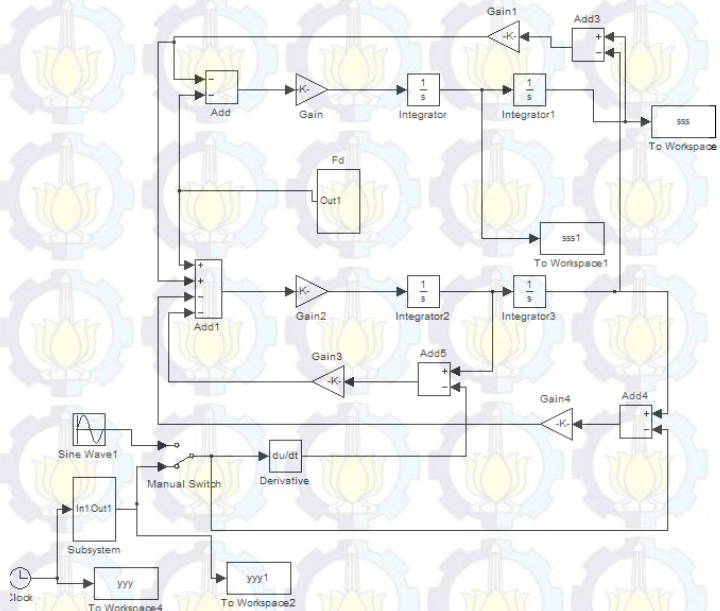


Gambar 4.14 Diagram blok simulink untuk bump yang dimodifikasi

4.3.2.2 Pemodelan kereta api seperempat kendaraan

Pada sistem seperempat kendaraan, nilai konstanta redaman pada massa *sprung* digantikan dengan nilai gaya redaman yang dihasilkan sistem HMRSA. Input yang digunakan dalam simulasi sistem seperempat kendaraan, yaitu input

sinusoidal dengan variasi kecepatan 20 km/jam, 40 km/jam, dan 60 km/jam dan input *bump* yang telah dimodifikasi dengan γ (*severity parameter*) sama dengan 1 untuk *low impact*. Parameter yang digunakan pada sistem seperempat kendaraan ini telah dijelaskan pada tabel 3.1



Gambar 4.15 Diagram blok simulink seperempat kendaraan



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

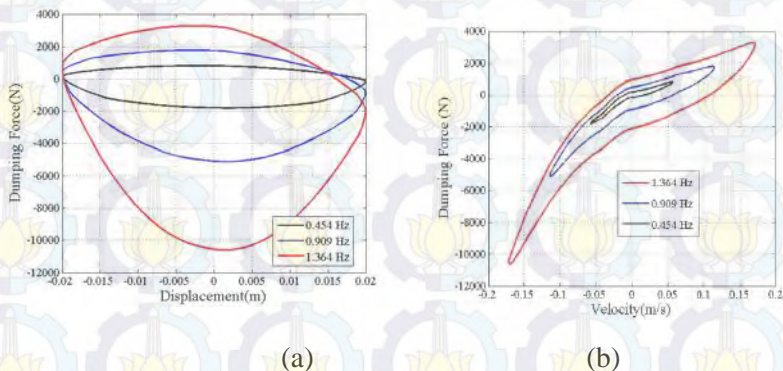
BAB V PEMBAHASAN

5.1 Pembahasan

Pada simulasi model setengah kendaraan dan HMERSA, diberikan 2 jenis input, yaitu sinusoidal dengan variasi kecepatan dan bump yang imodifikasi. Sebelum dilakukan pada model setengah kendaraan, terlebih dahulu dilakukan simulasi pada HMERSA. Simulasi pada HMERSA dilakukan dengan 3 jenis variasi frekuensi sesuai data yang didapat pada lapangan yaitu 0,455 Hz ;0,909 Hz, dan 1,364 Hz. Untuk mendapatkan gaya redam dan energy bangkitan pada HMERSA yang nantinya akan disimulasikan pada setengah kendaraan. Untuk simulasi setengah kendaraan dengan HMERSA akan dihasilkan respon perpindahan, kecepatan, percepatan, arus, tegangan, torsi, dan energi bangkitan.

5.2 Gaya Redam pada HMERSA

Skema hidrolik pada HMERSA dapat dilihat pada gambar 5.1, dengan sebuah silinder hidrolis yang terdiri atas dua buah orifice, dengan dimensi yang dapat dilihat pada tabel 3.2.



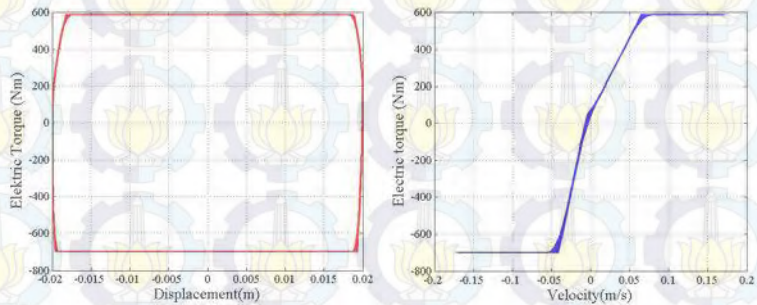
Gambar 5.1 Grafik respon (a) gaya redam terhadap perpindahan dan (b) gaya redam terhadap kecepatan

Gambar 5.1 merupakan hasil simulasi pada HMERSA dengan input 0,454 Hz; 0,909 Hz, dan 1,364 Hz. Dari gambar 5.1 Terlihat bahwa gaya redam terbesar pada HMERSA baik terhadap kecepatan maupun perpindahan terjadi saat input sebesar 1,364 Hz. Dimana nilai terbesar pada input sebesar 0,454 Hz saat kompresi sebesar 1794 N, sedangkan saat ekspansi sebesar 802,5 N. Saat diberi input sebesar 0,909 Hz didapatkan gaya redam saat kompresi sebesar 5105 N sedangkan saat ekspansi sebesar 1750 N. Saat diberi input sebesar 1,364 Hz didapatkan gaya redam pada saat kompresi sebesar 10640 N dan ekspansi sebesar 3235 N. Karena besar gaya redam yang dibutuhkan pada hidrolik kereta api antara 4900 N hingga 6174 N maka dipilih saat input sebesar 1,364 Hz. Besar gaya redam yang dihasilkan pada saat kompresi lebih besar daripada saat ekspansi karena memiliki luas penampang yang lebih besar dan sesuai dengan rumus $F = P \times A$.

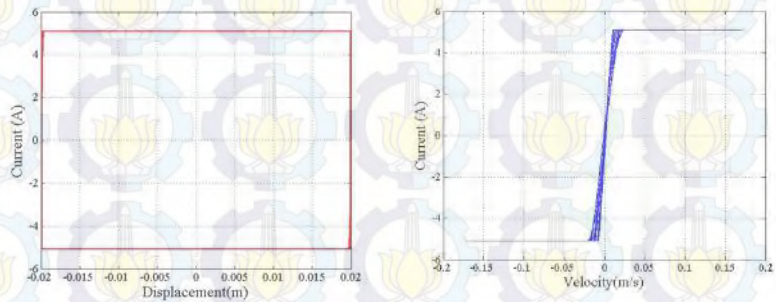
Tabel 5.1 Perbandingan nilai gaya redam pada berbagai input

Input (Hz)	Perpindahan (m)	Gaya Redam (N)	
		Kompresi	Ekspansi
0.454	0.005	1774 N	726,8 N
	0.01	1632 N	527,6 N
	0.015	1226 N	386,5 N
0.909	0.005	5016 N	1442 N
	0.01	4393 N	1059 N
	0.015	3196 N	429,5 N
1.364	0.005	10310 N	2665 N
	0.01	8754 N	1686 N
	0.015	6271 N	296,5 N

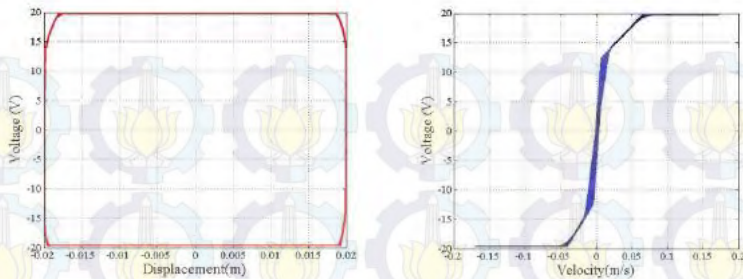
5.2.1 Grafik Arus, tegangan, torsi elektrik, dan daya bangkitan terhadap perpindahan dan kecepatan HMERSA pada input 1,364 Hz



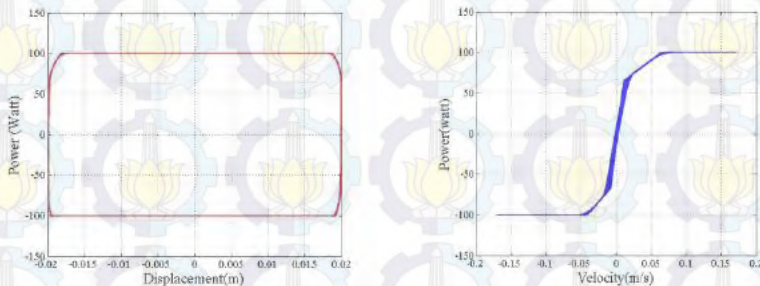
Gambar 5.2 Grafik torsi elektrik yang dihasilkan HMERSA



Gambar 5.3 Grafik arus yang dihasilkan HMERSA



Gambar 5.4 Grafik tegangan yang dihasilkan HMERSA



Gambar 5.5 Grafik daya bangkitan yang dihasilkan HMERSA

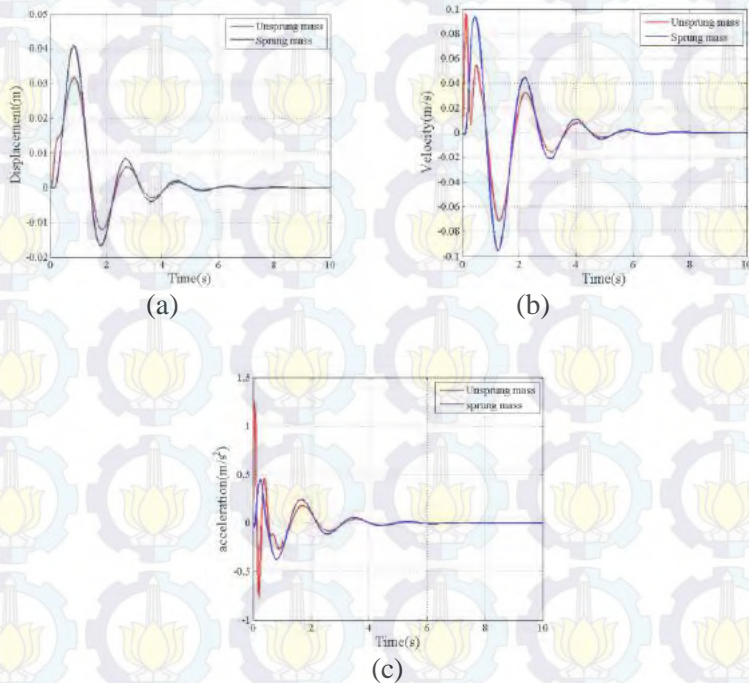
Pada sistem HMERSA, perlu diketahui respon generator agar dapat dianalisis energi listrik bangkitan yang dihasilkan. Gambar 5.2;5.3;5.4; dan 5.5 diatas merupakan hasil simulasi yang terdiri torsi elektrik, arus listrik, tegangan, dan daya listrik terhadap perpindahan serta kecepatan. Dari simulasi yang dilakukan, didapatkan arus trendline grafik yang relatif sama.

Daya listrik maksimal yang dihasilkan HMERSA yaitu sebesar 100 Watt dengan kapasitas generator sebesar 100 W. Sedangkan arus listrik maksimal 5,1 Ampere, Torsi elektrik maksimal 698,5 Nm, dan voltage maksimal 19,64 Volt.

5.3 Respon Dinamis dan Daya listrik bangkitan dari aplikasi HMERSA pada kereta api.

5.3.1 Grafik Respon Dinamis pada kendaraan dengan input bump yang dimodifikasi

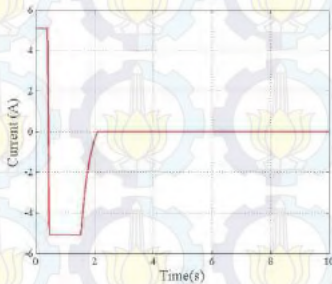
Berikut adalah gambar 5.3 yang menggambarkan bodi kendaraan baik massa sprung ataupun massa unsprung yang meliputi displacement terhadap waktu, kecepatan terhadap waktu, dan percepatan terhadap waktu.



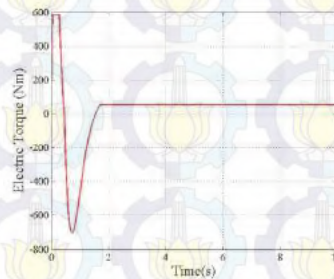
Gambar 5.6 grafik respon dinamis pada kereta api dengan input bump yang dimodifikasi (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan.

Dari grafik 5.6 dapat dilihat bahwa trendline ketiga grafik sama, dengan kenaikan drastis pada awal kemudian turun dan semakin kecil hingga stabil. Displacement maksimum pada massa sprung terjadi saat 0,82s dengan besar displacement 0,041m, sedangkan massa unsprung memiliki displacement maksimal saat 0,83s dengan displacement sebesar 0,0317m. Massa sprung dan massa unsprung stabil ketika 7s. Pada grafik tentang kecepatan terhadap waktu terlihat juga bahwa massa unsprung mengalami kecepatan tertinggi ketika 0,12 s dengan kecepatan 0,096m/s, sedangkan massa sprung terjadi kecepatan maksimum ketika 0,44s dengan kecepatan 0,094 m/s. Pada grafik percepatan terhadap waktu terlihat bahwa massa unsprung mengalami percepatan maksimum ketika 0,037 s dengan percepatan sebesar $1,258 \text{ m/s}^2$, sedangkan pada massa sprung akan mengalami percepatan maksimum ketika 0,25 s dengan percepatan sebesar $0,454 \text{ m/s}^2$. Ketiga grafik akan stabil ketika waktu 7s.

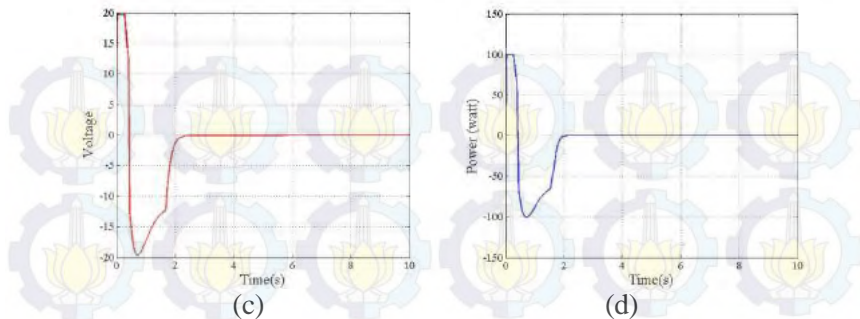
5.3.1.1 Grafik respon kelistrikan akibat input bump yang dimodifikasi



(a)



(b)



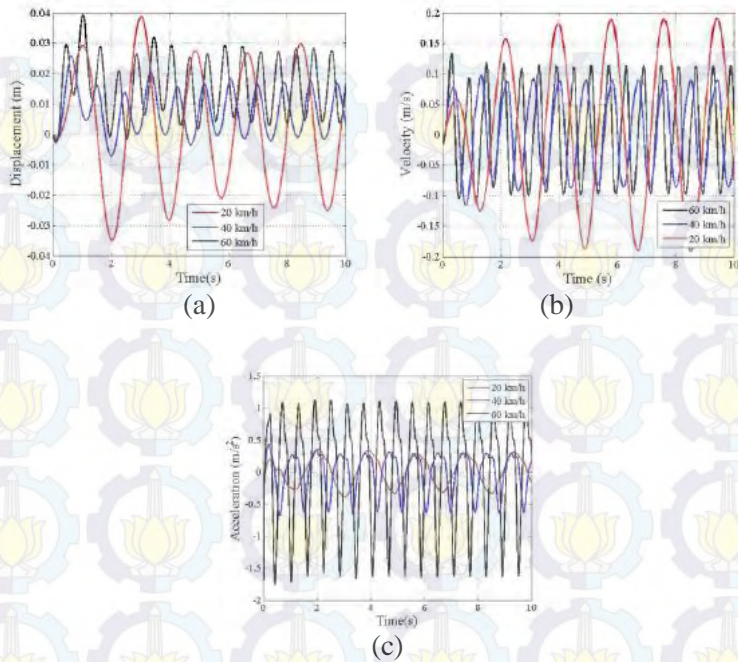
Gambar 5.7 Respon kelistrikan generator akibat bump yang dimodifikasi meliputi (a) Arus, (b) power, (c) voltage, (d) torsi terhadap waktu

Keempat gambar 5.7 menunjukkan bahwa respon kelistrikan pada kendaraan memiliki trendline yang sama. Pada saat awal simulasi pada kendaraan memiliki trendline yang sama. Pada saat awal simulasi grafik akan naik dan mencapai puncak ketika 0,4s, lalu grafik akan perlahan turun. Nilai maksimal pada torsi elektrik terjadi pada 698,5 Nm, arus pada 5 A, Tegangan pada 19,8 V dan Power pada 100 Watt. Kemampuan listrik yang dihasilkan pada HMERSA terbatas hingga pada 100 W

5.3.2 Grafik respon dinamis pada kendaraan dengan HMERSA pada input sinusoidal

5.3.2.1 Grafik respon dinamis dengan input kecepatan 20 km/h, 40 km/h, dan 60 km/h

Grafik respon berikut merupakan respon dinamis berupa pada kereta api. Dari grafik 5.8 ber kerikut akan ditampulkan grafik perpindahan, kecepatan, dan percepatan yang terjadi pada massa spung dengan 3 variasi input yaitu 20 km/h, 40 km/h, dan 60 km/h.

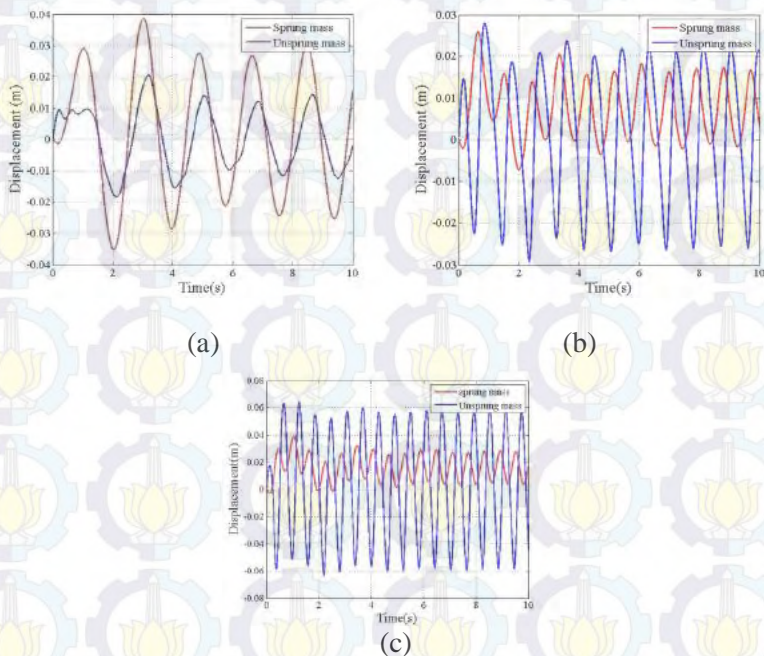


Gambar 5.8 Grafik respon dinamis pada massa sprung dengan 3 variasi input

Gambar 5.8 diatas merupakan grafik respon dinamis pada massa sprung dengan 3 perbedaan input yaitu 20 km/h, 40 km/h, dan 60 km/h. Dari grafik displacement yang pada massa unsprung terlihat bahwa kereta api akan mengalami perpindahan yang paling tinggi ketika mendapat input pada 20 km/h, sedangkan saat mendapat input 40 km/h perpindahan terjadi paling kecil yaitu 0,016 m, lalu pada input 60 km/h massa unsprung akan mengalami perpindahan lebih tinggi dari 40 km/h, namun lebih rendah daripada 20 km/h. Pada grafik kecepatan terhadap waktu terlihat bahwa kecepatan tertinggi terjadi ketika input 60 km/h dengan kecepatan saat stabil 0,12 m/s, lalu pada input 20 km/h memiliki kecepatan 0,85 m/s, dan pada 40 km/h memiliki

kecepatan yang stabil yaitu 0,75 m/s. Pada grafik percepatan relatif sama dengan grafik kecepatan, dengan input 60 km/h akan mengalami percepatan tertinggi dengan $1,8 \text{ m/s}^2$ serta pada input 40 km/h dan 20 km/h memiliki percepatan yang hampir sama yaitu 0,5 m/s

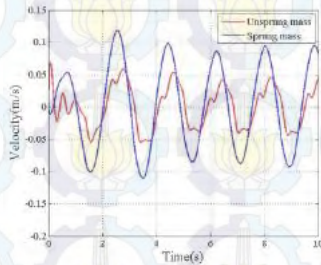
5.3.2.2 Grafik respon dinamis pada massa sprung dan unsprung dengan input 20 km/h, 40 km/h, dan 60 km/h



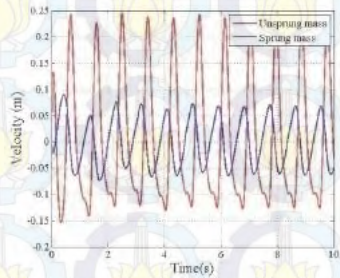
Gambar 5.9 Perpindahan pada kereta dengan input (a) 20km/h, (b) 40 km/h, (c) 60 km/h

Gambar 5.9 menunjukkan perbandingan respon dinamis pada massa unsprung dan sprung dengan 3 input kecepatan yang berbeda yaitu 20 km/h, 40 km/h, dan 60 km/h. Pada input 20 km/h perpindahan pada massa sprung lebih tinggi daripada massa

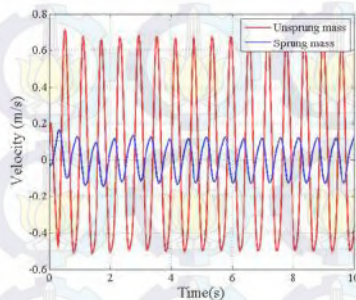
unsprung. Sedangkan pada input 40 km/h dan 60 km/h memiliki kesamaan pada respon dengan massa unsprung memiliki perpindahan yang lebih besar daripada massa sprung.



(a)



(b)

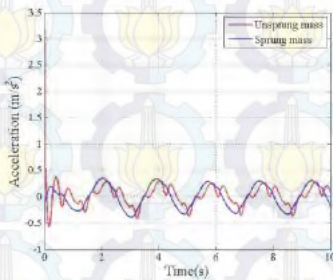


(c)

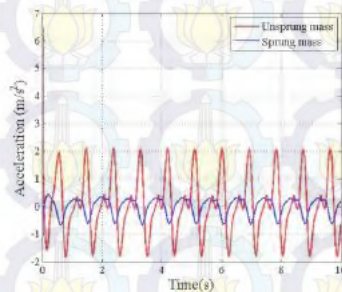
Gambar 5.10 Velocity pada kereta api dengan input (a) 20 km/h, (b) 40 km/h, dan (c) 60 km/h

Gambar 5.10 merupakan grafik respon dinamis kecepatan terhadap waktu dengan 3 input berbeda yaitu 20 km/h, 40 km/h, dan 60 km/h. Respon yang dihasilkan pada 20 km/h massa sprung memiliki kecepatan yang lebih tinggi daripada massa unsprung. Sedangkan pada input 40 km/h dan 60 km/h respon yang diberikan relative sama dengan massa unsprung memiliki kecepatan lebih tinggi daripada massa sprung. Respon kecepatan

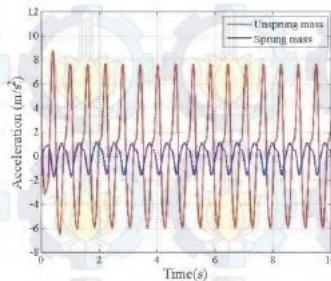
terendah pada massa sprung terjadi ketika input 40 km/h dengan kecepatan sebesar 0,08 m/s. Sedangkan kecepatan tertinggi ketika input 20 km/h yaitu 0,1 m/s. Respon kecepatan tertinggi pada massa unsprung terjadi ketika input 60 km/h dengan kecepatan 0,7 m/s dan memiliki kecepatan terendah ketika input 20 km/h dengan kecepatan 0,08 m/s.



(a)



(b)



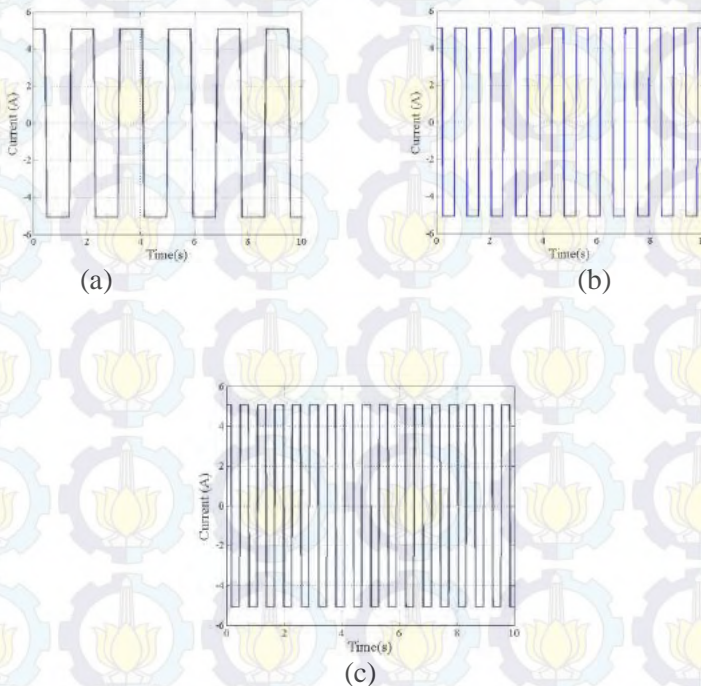
(c)

Gambar 5.11 Percepatan pada kereta api dengan input (a) 20 km/h, (b) 40 km/h, dan (c) 60 km/h

Gambar 5.11 menunjukkan grafik respon dinamis pada kereta api dengan 3 input kecepatan berbeda yaitu 20 km/h, 40 km/h, dan 60 km/h. Respon yang ditimbulkan pada ketiga grafik memiliki trendline yang sama, dengan dengan grafik kecepatan

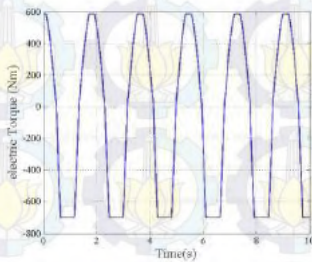
dan perpindahan. Dimana saat input 20 km/h percepatan pada massa sprung lebih tinggi daripada massa unsprung. Sedangkan pada input input 40 km/h dan 60 km/h massa unsprung memiliki percepatan yang lebih tinggi daripada massa sprung. Percepatan tertinggi pada massa unsprung terjadi ketika input 60 km/h dengan 7 m/s^2 dan terendah ketika input 20 km/h dengan $0,4 \text{ m/s}^2$. Sedangkan pada massa sprung percepatan tertinggi terjadi ketika 20 km/h dengan $0,5 \text{ m/s}^2$ dan percepatan terendah ketika 40 km/h dengan $0,25 \text{ m/s}^2$.

5.3.2.3 Grafik kelistrikan pada kereta api dengan input kecepatan 20 km/h, 40 km/h, dan 60 km/h

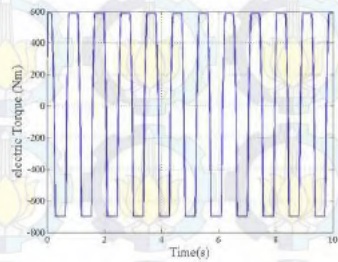


Gambar 5.12 arus listrik yang dihasilkan kereta api pada input (a) 20km/h, (b) 40 km/h, dan 60 km/h

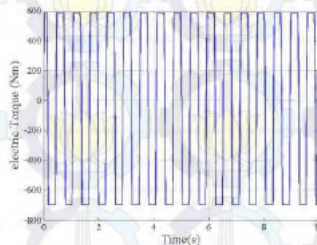
Gambar 5.12 merupakan grafik kelistrikan yang dihasilkan HMERSA dengan 3 variasi input kecepatan . Besar arus yang dihasilkan sama yaitu 5.1 ampere yang membedakan hanya intensitas dari arus yang dihasilkan.. Hal ini terjadi karena batas kemampuan arus yang dihasilkan oleh HMERSA.



(a)



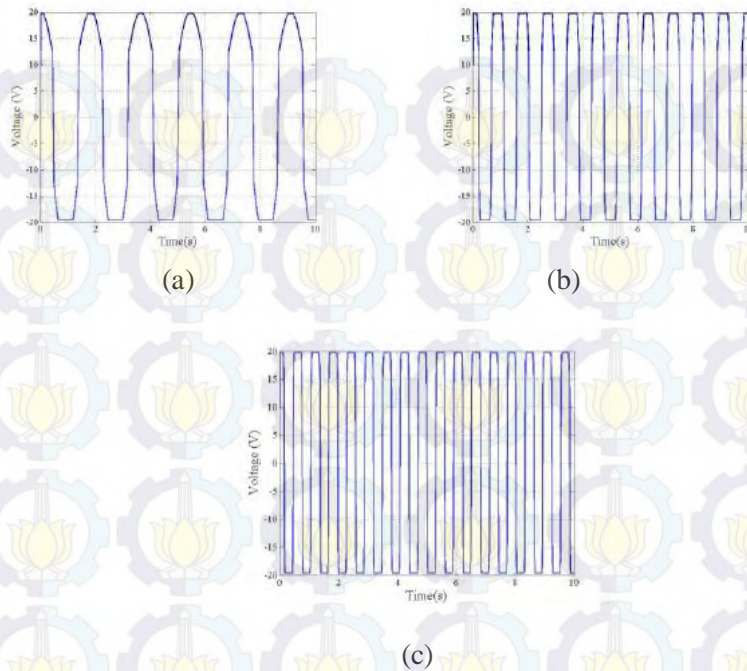
(b)



(c)

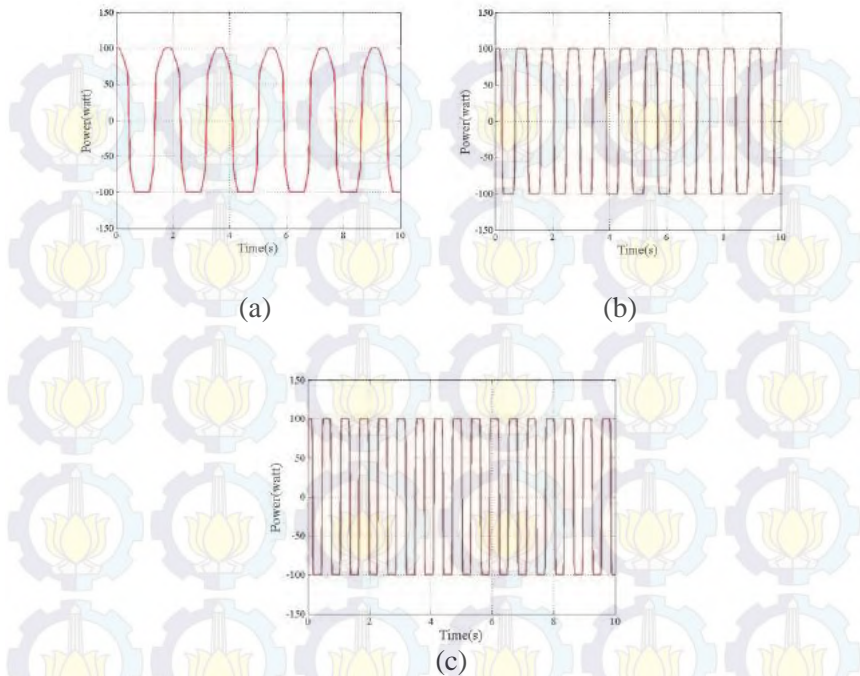
Gambar 5.13 Grafik torsi elektrik pada kereta api dengan input (a) 20 km/h, (b) 40 km/h, dan (c) 60 km/h

Gambar 5.13 merupakan grafik torsi elektrik yang dihasilkan pada HMERSA dengan 3 variasi input. Terlihat bahwa besar torsi elektrik yang dihasilkan pada saat kompresi adalah 700 Nm, sedangkan saat ekspansi adalah 600 Nm. Trendline dari ketiga grafik tersebut relatif sama, hanya intensitas yang berbeda.



Gambar 5.14 Grafik tegangan yang dihasilkan kereta api dengan input (a) 20 km/h, (b) 40 km/h, dan (c) 60 km/h

Grafik 5.14 Merupakan grafik tegangan terhadap waktu dengan 3 variasi input. Grafik yang dihasilkan pada ketiga input relative sama, dengan besar tegangan yang dihasilkan adalah 20 volt baik saat komprresi maupun ekspansi. Hal ini terjadi kerna terbatasnya kemampuan dari HMERSA. Hanya saat input 20 km/h saja yang sedikit berbeda, dan banyaknya intensitas yang tegangan yang dihasilkan saja yang berbeda.



Gambar 5.15 Grafik energi bangkitan pada kereta api dengan input (a) 20 km/h, (b) 40 km/h, dan 60 km/h.

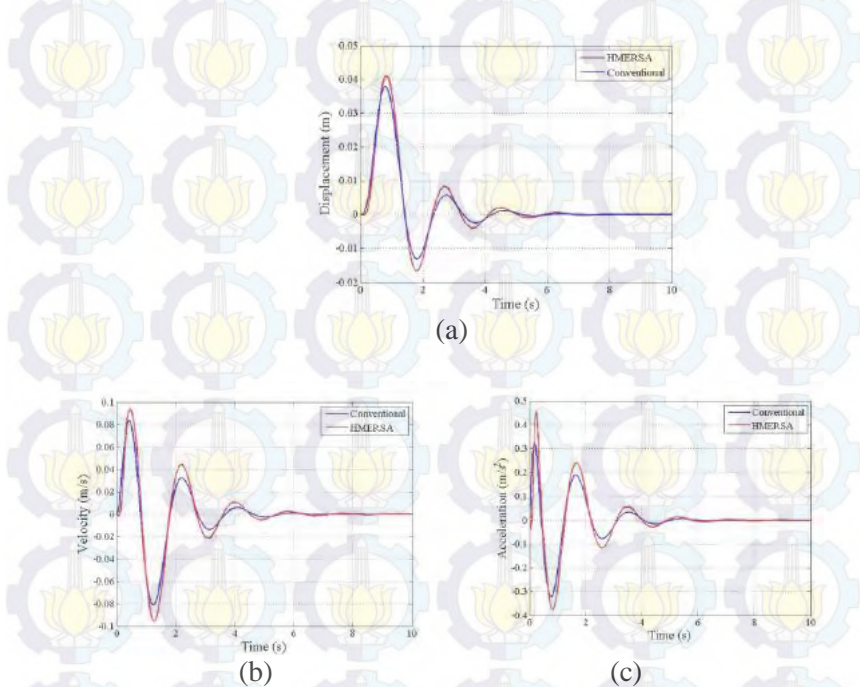
Gambar 5.15 merupakan grafik daya bangkitan terhadap waktu dengan variasi 3 input. Karena batas generator terbatas hanya 100 W, maka daya bangkitan yang dihasilkan ketiga grafik maksimal hanya 100 W, dengan trendline yang relative sama.

5.4 Perbandingan respon dinamis pada kereta api dengan menggunakan suspensi konvensional dan HMERSA

Untuk melihat perbedaan respon dinamis pada perpindahan, kecepatan, dan percepatan terhadap waktu maka dilakukan perbandingan pada seperempat kendaraan dengan suspensi HMERSA dan suspensi konvensional ($c=49.000 \text{ Ns/m}$)

dengan input bump yang dimodifikasi dan sinusoidal dengan kecepatan 20 km/h, 40 km/h, dan 60km/h

5.4.1 Perbandingan respon dinamis pada kereta api dengan suspensi konvensional dan HMERSA pada input bump yang dimodifikasi

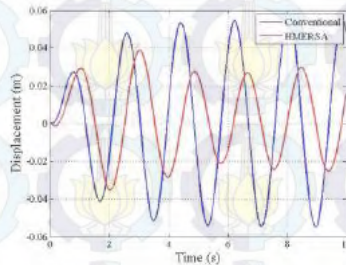


Gambar 5.16 Grafik perbandingan respon dinamis pada kereta api dengan input bump yang dimodifikasi

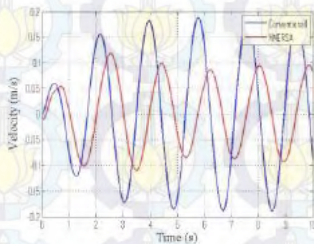
Gambar 5.16 merupakan grafik respon dinamis pada kendaraan saat terkena input bump yang dimodifikasi. Trendline ketiga grafik relatif sama dengan naik saat awal lalu turun dan semakin kecil dan akhirnya stabil. Perpindahan, kecepatan, dan percepatan yang dihasilkan HMERSA umumnya sedikit lebih besar daripada yang dihasilkan oleh silinder konvensional. Nilai

tertinggi pada perpindahan di HMERSA terjadi 0,04 m dan pada konvensional 0,37 m yang semuanya terjadi saat 1s.

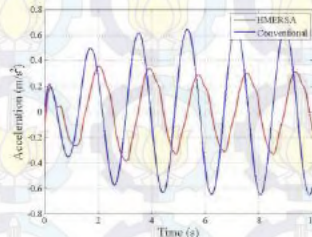
5.4.2 Perbandingan respon dinamis pada kereta api dengan suspensi konvensional dan HMERSA pada input sinusoidal pada kecepatan 20 km/h, 40 km/h, dan 60 km/h



(a)



(b)

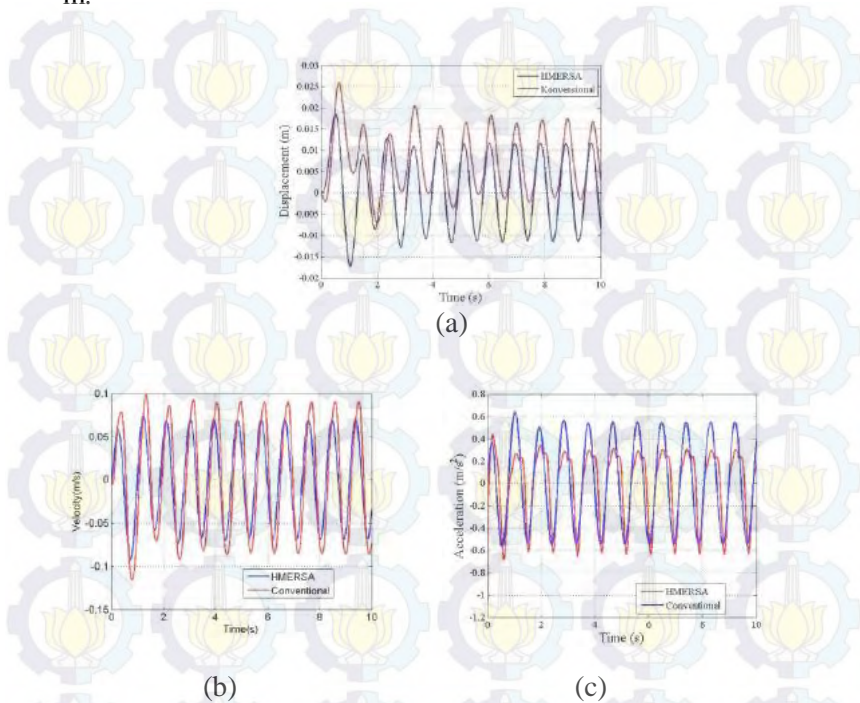


(c)

Gambar 5.17 Grafik respon dinamis dengan input sinusoidal dengan kecepatan 20km/h

Grafik 5.17 merupakan grafik respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan dengan input sinusoidal 20 km/h. Trendline yang dihasilkan oleh ketiga grafik relatif sama dan perpindahan, kecepatan, dan percepatan yang ditimbulkan oleh HMERSA lebih kecil daripada yang dihasilkan oleh peredam konvensional. Nilai tertinggi perpindahan saat stabil pada

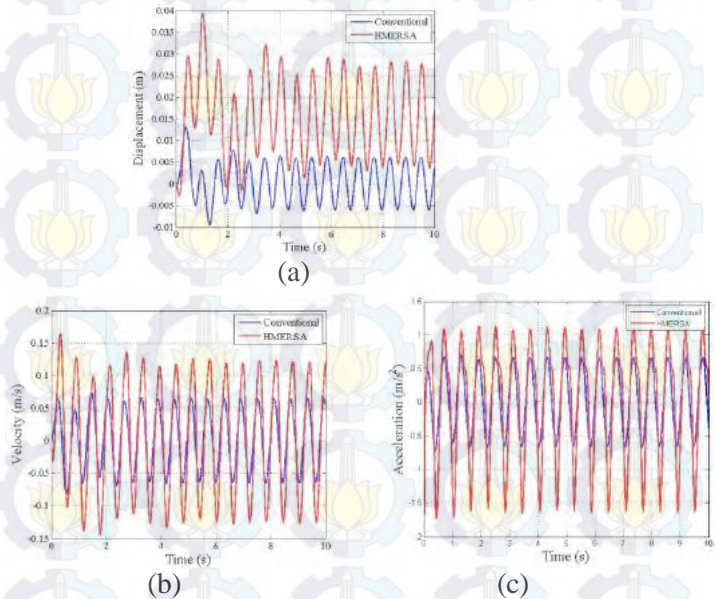
HMERSA 0,025 m sedangkan pada peredam konvensional 0,052 m.



Gambar 5.18 Grafik perbedaan respon dinamis dengan input sinusoidal pada kecepatan 40km/h

Gambar 5.18 merupakan grafik perpindahan, kecepatan, dan percepatan terhadap waktu dengan input sinusoidal pada kecepatan 40 km/h. dari grafik 5.18 terlihat bahwa trendline yang dihasilkan sama, dimana perpindahan pada HMERSA lebih tinggi daripada perpindahan yang terjadi pada peredam konvensional. Namun saat grafik kecepatan dan percepatan terhadap waktu peredam HMERSA lebih rendah daripada peredam konvensional. Nilai tertinggi saat perpindahan pada HMERSA adalah 0,015m dan pada peredam konvensional adalah 0,011m. Nilai kecepatan

saat stabil pada HMERSA 0,07 m/s , sedangkan pada peredam konvensional adalah 0,085 m/s. Nilai percepatan tertinggi saat stabil pada HMERSA adalah $0,25 \text{ m/s}^2$, sedangkan pada peredam konvensional $0,5 \text{ m/s}^2$.



Gambar 5.19 Grafik respon dinamis dengan input sinusoidal pada kecepatan 60 km/h

Gambar 5.19 merupakan grafik perpindahan, kecepatan, dan percepatan terhadap waktu pada input 60 km/h. Dari gambar 5.19 terlihat bahwa trendline yang terjadi pada kereta api dari HMERSA dan peredam konvensional relatif sama. Perbedaan signifikan terjadi pada nilai perpindahan, dimana nilai perpindahan pada HMERSA mencapai 0,028 m sedangkan pada peredam konvensional 0,05 m. Pada grafik kecepatan terhadap waktu nilai stabil pada HMERSA sebesar 0,12 m/s, sedangkan

pada silinder konvensional 0,5 m/s. Pada grafik percepatan terhadap waktu nilai stabil pada HMERSA sebesar 1 m/s², sedangkan pada peredam konvensional 0,7 m/s²

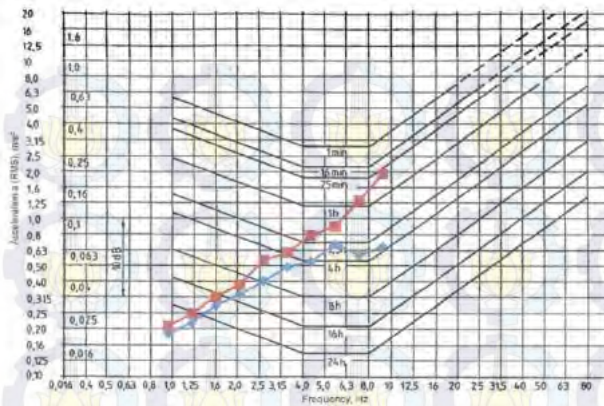
5.5 Grafik RMS (Root Mean Square)

5.5.1 Grafik RMS percepatan bodi kendaraan pada input sinusoidal dengan variasi kecepatan

Grafik 5.2 berikut merupakan grafik respon percepatan RMS (Root Mean Square) terhadap waktu dengan frekuensi asumsi lamda 3 meter. Simulasi yang dilakukan dengan variasi kecepatan antara 0-100 km/jam dengan kenaikan setiap 10 km/jam.

Tabel 5.2 Perbandingan RMS pada HMERSA dan peredam konvensional

velocity (km/h)	Frequency (Hz)	Arms (m/s ²)	
		HMERSA	Konvensional
10	0.926	0.28	0.24
20	1.852	0.35	0.3
30	2.778	0.45	0.4
40	3.704	0.52	0.465
50	4.63	0.66	0.54
60	5.556	0.7	0.62
70	6.481	0.8	0.65
80	7.407	0.85	0.75
90	8.333	1	0.688
100	9.259	1.15	0.737



Gambar 5.20 Respon percepatan RMS akibat input sinusoidal

Dari gambar 5.20 Terlihat bahwa kereta api yang terpasang HMERSA memiliki ketahanan yang lebih rendah daripada kereta api yang terpasang peredam konvensional. Pada kecepatan 10-20 km/ jam kereta api dengan HMERSA dan konvensional akan memiliki ketahanan yang hampir sama yaitu melebihi 24 jam. Saat kecepatan 30-40 km/jam kereta api akan dengan HMERSA memiliki ketahanan sekitar 8-16 jam, sedangkan pada kereta api konvensional memiliki ketahanan sekitar 10-20 jam. Pada kecepatan 50-60 km/jam, kereta api dengan HMERSA akan memiliki ketahanan 4-5 jam, sedangkan pada kereta api konvensional 5-8 jam. Pada kecepatan 70-80 km/jam kereta api dengan HMERSA akan memiliki ketahanan pada penumpang selama 1-2 jam, sedangkan pada kereta api konvensional akan ketahanan penumpang akan bertahan antara 2,5-4 jam. Pada kecepatan 90-100 km/jam pada kereta api dengan HMERSA penumpang akan mampu bertahan 25 menit hingga 1 jam, sedangkan pada kereta api konvensional penumpang akan bertahan 2,5- 4 jam.

5.5.2 Grafik Displacement Transmissibility pada input sinusoidal dengan variasi kecepatan

Tabel 5.3 merupakan data tabel simulasi yang dilakukan pada keeta api dengan HMERSA dan kererta api dengan peredam konvensional. Kedua simulasi dilakukan pada kecepatan 0-100 km/jam. Kedua simulasi menggunakan lamda= 10 m.

Tabel 5.3 Grafik transmissibility pada kereta api dengan HMERSA

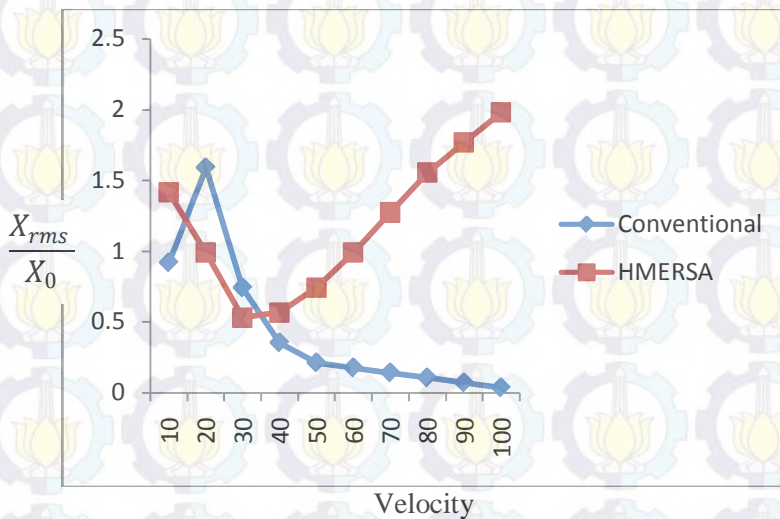
velocity (km/h)	Frequency (Hz)	X_{rms} (m)	X_0 (m)	X_{rms}/X_0
10	0,278	0.0282	0.02	1.41
20	0.55	0.1979	0.02	0.989
30	0.828	0.0106	0.02	0.53
40	1.106	0.0113	0.02	0.56
50	1.384	0.0148	0.02	0.742
60	1.662	0.0197	0.02	0.989
70	1.94	0.0254	0.02	1.272
80	2.218	0.0311	0.02	1.554
90	2.496	0.0353	0.02	1.767
100	2.774	0.0395	0.02	1.9796

Tabel 5.4 Grafik transmissibility pada kereta api dengan peredam konvensional

velocity (km/h)	Frequency (Hz)	X_{rms} (m)	X_0 (m)	X_{rms}/X_0
10	0.278	0.026	0.02	0.9191
20	0.55	0.045	0.02	1.59
30	0.828	0.021	0.02	0.74

40	1.106	0.01	0.02	0.35
50	1.384	0.006	0.02	0.21
60	1.662	0.005	0.02	0.176
70	1.94	0.004	0.02	0.1414
80	2.218	0.003	0.02	0.106
90	2.496	0.002	0.02	0.0707
100	2.774	0.001	0.02	0.03535

Dari kedua tabel 5.3 Dan 5.4 Didapat grafik seperti pada gambar 5.16 berikut. Gambar 5.20 Dibawah ini merupakan grafik X_{RMS}/X_0 terhadap variasi kecepatan. Dimana X_{RMS} menunjukkan respon perpindahan kendaraan dan X_0 menunjukkan amplitudo.



Gambar 5.21 grafik X_{RMS}/X_0 terhadap kecepatan

Gambar 5.21 Menunjukkan grafik displacement transmissibility antara HMERSA dan peredam konvensional

dengan variasi kecepatan 0-100 km/jam, X_{rms}/X_0 merupakan perbandingan respon perpindahan pada massa sprung dibandingkan input amplitudo. Contoh pembacaan grafik pada gambar 5.21 adalah saat kecepatan 30 km/h pada HMERSA terlihat perbandingan X_{rms}/X_0 adalah 0,5 yang berarti bahwa X_{rms} akan mengalami perpindahan 0.01 cm ketika diberi input amplitude sebesar 0.02 cm. Dari grafik pada gambar 5.21 dapat disimpulkan bahwa kereta api dengan peredam konvensional lebih baik daripada kereta api dengan HMERSA saat kecepatan 40 -100 km/jam, karena memiliki nilai displacement transmissibility yang lebih rendah. Tetapi saat kecepatan rendah yaitu 20-30 km/jam HMERSA memiliki displacement transmissibility yang lebih rendah sehingga lebih baik daripada peredam konvensional. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kereta api dengan HMERSA ditujukan pada kereta api jarak dekat dengan kecepatan 30 km/h. Penggunaan kereta api dengan HMERSA memiliki keuntungan dapat menghasilkan daya listrik, sedangkan kereta api dengan peredam konvensional tidak dapat menghasilkan daya listrik. Adapun daya maksimum yang dapat dibangkitkan adalah 100 W, karena kemampuan generator yang dipakai 100 W. Salah satu cara untuk menurunkan displacement transmissibility adalah dengan memperbesar gaya redam pada HMERSA, sehingga dengan akan mengakibatkan turunnya perpindahan pada massa sprung (X_{rms}).

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Pada HMERSA semakin besar frekuensi input sinusoidal maka semakin besar gaya redam yang dihasilkan.
2. Besar gaya redam yang dihasilkan saat kompresi lebih besar daripada saat ekspansi
3. Untuk respon dinamis pada HMERSA, pada 0,454 Hz terbesar adalah 1794 N, pada 0,909 terbesar 5105 N, dan pada 1,364 N sebesar 10640 N
4. Respon kelistrikan pada HMERSA, daya listrik bangkitan maksimal yaitu sebesar 100 Watt. Sedangkan arus dan tegangan listrik maksimal yang dihasilkan sebesar 5,1 A dan 20 Volt.
5. Respon dinamis pada input 20 k/jam displacement pada massa sprug lebih tinggi daripada massa unsprung yaitu 0,028 m berbanding 0,15 m. Sedangkan pada 40 km/jam displacement pada massa sprung lebih rendah daripada massa unsprung yaitu 0,018 m dan 0,022 m. Pada input 60 km/jam displacement pada massa sprung lebih rendah daripada massa unsprung, yaitu 0,022 m berbanding 0,6 m.
6. Dari pemberian input sinusoidal 20 km/jam pada kereta api dengan HMERSA didapatkan hasil bahwa nilai maksimum dari respon perpindahan sebesar 0.025 m, kecepatan sebesar 0.1 m/s, percepatan sebesar 0.3 m/s^2 . Sedangkan daya maksimum yang dihasilkan sebesar 100 Watt, arus listrik sebesar 5 A, serta tegangan listrik sebesar 20 Volt.
7. Dari pemberian input sinusoidal 40 km/jam, respon dinamis yang didapat yaitu nilai maksimum dari perpindahan sebesar 0.15 m, kecepatan sebesar 0.05 m/s,

- percepatan sebesar 0.3 m/s^2 . Untuk hasil respon kelistrikan maksimum yaitu daya sebesar 100 Watt, arus listrik sebesar 5 A, serta tegangan listrik sebesar 20 Volt.
8. Dari pemberian input sinusoidal 60 km/jam, nilai maksimum dari perpindahan sebesar 0.025 m, kecepatan sebesar 0.015 m/s , percepatan sebesar 1 m/s^2 . Untuk respon daya listrik yang dihasilkan yaitu sebesar 100 Watt, arus listrik sebesar 5 A, dan tegangan listrik sebesar 20 Volt.
 9. Pada pemberian input bump yang dimodifikasi, rata-rata keseluruhan respon mengalami osilasi sebanyak 3 kali. Untuk respon perpindahan maksimum adalah sebesar 0.04 m, kecepatan sebesar 0.8 m/s , percepatan sebesar 1.3 m/s^2 . Sedangkan daya listrik bangkitan maksimum sebesar 100 Watt, arus listrik sebesar 5 A, dan tegangan listrik sebesar 20 Volt.
 10. Dari grafik percepatan RMS, ketahanan pengendara baik itu pada kereta api yang dipasangkan dengan HMERSA dan konstanta redaman C memiliki waktu lebih dari 24 jam ketika kecepatannya mencapai 10-20 km/jam
 11. Kereta api yang dipasang *shock absorber* dengan nilai C sebesar 49000 Ns/m memiliki displacement transmissibility yang lebih baik dari HMERSA ketika kecepatan diatas 40 km/jam, sedangkan dengan HMERSA displacement transmissibility ketika kecepatan dibawah 40 km/jam.
 12. Displacement Transmissibility terendah terjadi pada HMERSA terjadi ketika kecepatan 30 km/h, sedangkan pada shock absorber konvensional ketika kecepatan 100 km/h.

6.2 Saran

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan dan hasil yang didapatkan, saran untuk pengembangan dalam penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

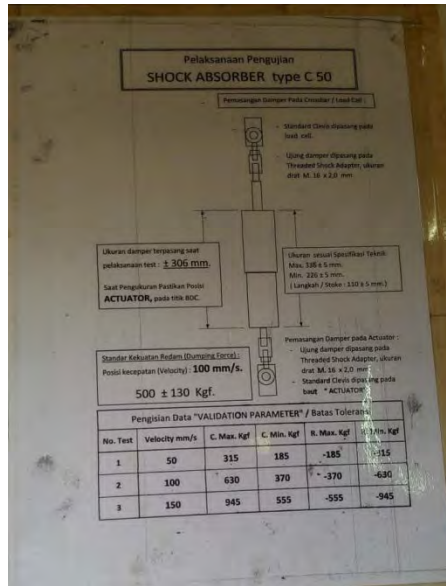
1. Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk mencoba menguji respon HMERSA dengan dengan massa kendaraan yang sama ataupun berbeda dengan bogie yang berbeda.
2. Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk mencoba untuk menggunakan generator yang lebih besar, agar energi bangkitan maksimum dapat diketahui
3. Disarankan pada penelitian selanjutnya disertai gaya pitching dan bouncing pada kereta api.

Halaman ini Sengaja Dikosongkan

LAMPIRAN

Parameters	Values
Vehicle body, bogie frame, and wheelset masses (kg)	$m_v=34,000, m_b=3,000, m_w=1,400$
Roll, pitch, and yaw moments of inertia of the vehicle body ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	$I_{v_x}=75.06 \times 10^4, I_{v_y}=2.086 \times 10^6$
Roll, pitch, and yaw moments of inertia of the bogie frame ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	$I_{b_x}=2,260, I_{b_y}=2,710, I_{b_z}=3,160$
Roll, pitch, and yaw moments of inertia of the wheelset ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	$I_{w_x}=915, I_{w_y}=140, I_{w_z}=915$
Primary longitudinal, lateral, and vertical stiffnesses (kN/m)	$K_{p1}=10,000, K_{p2}=5,000, K_{p3}=750$
Secondary longitudinal, lateral, and vertical stiffnesses (kN/m)	$K_{s1}=150, K_{s2}=150, K_{s3}=400$
Primary longitudinal, lateral, and vertical damping coefficients (kNs/m)	$C_{p1}=12, C_{p2}=12, C_{p3}=15 (450)$
Secondary longitudinal, lateral, and vertical damping coefficients (kNs/m)	$C_{s1}=200 (10), C_{s2}=30 (10), C_{s3}=80 (88)$
Vertical and lateral rail stiffnesses (kN/m)	$K_{r1}=62 \times 10^6, K_{r2}=16.17 \times 10^6$
Radius of the curved track (m)	$R_f = r$
Cant angle (rad)	$\phi_w=0.0873$
Friction coefficient	$\mu=0.2$
Acceleration due to gravity (m/s^2)	$g=9.81$
Wheel conicity	$\bar{z}=0.05$
Flange clearance (m)	$\delta=0.00923$
Lateral creep coefficient (N)	$f_{11}=10.2 \times 10^6$
Lateral/spin creep coefficient ($\text{N}\cdot\text{m}^2$)	$f_{12}=3120$
Spin creep coefficient (N)	$f_{22}=16$
Longitudinal creep coefficient (N)	$f_{33}=15 \times 10^6$
Half of the track gauge (m)	$a=0.7465$
Wheel radius (m)	$r_w=0.4575$
Half of the secondary longitudinal and vertical spring arms (m)	$b_{11}, b_{13}=1.21$
Half of the secondary longitudinal and vertical damper arms (m)	$b_{21}, b_{23}=1.21$
Half of the primary longitudinal and vertical spring arms (m)	$b_{11}, b_{13}=0.978$
Half of the primary longitudinal and vertical damper arms (m)	$b_{21}, b_{23}=0.978$
Half of the primary lateral spring and damper arms (m)	$L_{11}, L_{12}=1.2$
Distance between the vehicle body and the bogie frame mass centers (m)	$L_c=9$
Height of the vehicle body mass center above the wheelset mass center (m)	$h=1.4$
Height of the secondary suspension above the bogie frame mass center (m)	$h_b=0.03$
Height of the bogie mass center above the wheelset mass center (m)	$h_c=0.44$

Data spesifikasi kereta api



NO.	PEGAS DUKUN G.	PARAMETER DAN NILAI				REMARKS
		FREE HEIGHT	INSTR. LOAD		MAX. LOAD	
1	1. PD NT 11 K2/K3/K3	278 ± 3mm	228 ± 3mm	1778 Kgf	279 ± 3mm	3098 Kgf
2	2. PD TB 398 - K1/K3	278 ± 3mm	223 ± 3mm	1892 Kgf	228 ± 3mm	2156 Kgf
3	3. PD TB 398 - K2/K3	278 ± 3mm	219 ± 3mm	1708 Kgf	219 ± 3mm	2156 Kgf
4	4. PD TB 398 - BP	286 ± 3mm	234 ± 3mm	5267 Kgf	223 ± 3mm	2641 Kgf
5	5. BUKUND K7	218 ± 4mm	200 ± 4mm	1690 Kgf	187 ± 4mm	2383 Kgf
PEGAS AYUN						
6	6. PBA LD NT 11 - K2	286 ± 3mm	224 ± 3mm	3025 Kgf	199 ± 3mm	4225 Kgf
7	7. LD NT 11 K3/K3	296 ± 3mm	213 ± 3mm	3025 Kgf	199 ± 3mm	4675 Kgf
8	8. LD NT 11 K3/K3	296 ± 3mm	214 ± 3mm	3025 Kgf	200 ± 3mm	4675 Kgf
9	9. LD NT 60 - BP	301 ± 3mm	226 ± 3mm	4279 Kgf	225 ± 3mm	5125 Kgf
10	10. LD NT 11 K1/K1	311 ± 3mm	218 ± 3mm	3125 Kgf	221 ± 3mm	3645 Kgf
11	11. LD TB 398 K1/K1	315 ± 3mm	218 ± 3mm	3125 Kgf	225 ± 3mm	3645 Kgf
12	12. LD TB 398 K1/K1	327 ± 3mm	216 ± 3mm	3875 Kgf	219 ± 3mm	4625 Kgf
13	13. LD NT 60 K1/K1	337 ± 3mm	240 ± 3mm	3525 Kgf	230 ± 3mm	3995 Kgf
14	14. LD TB 398 K2/K3	296 ± 6mm	297 ± 3mm	2750 Kgf	193 ± 3mm	4870 Kgf
15	15. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
16	16. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
17	17. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
18	18. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
19	19. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
20	20. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
21	21. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
22	22. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
23	23. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
24	24. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
25	25. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
26	26. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
27	27. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
28	28. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
29	29. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
30	30. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
31	31. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
32	32. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
33	33. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
34	34. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
35	35. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
36	36. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
37	37. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
38	38. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
39	39. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
40	40. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
41	41. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
42	42. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
43	43. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
44	44. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
45	45. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
46	46. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
47	47. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
48	48. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
49	49. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
50	50. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
51	51. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
52	52. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
53	53. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
54	54. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
55	55. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
56	56. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
57	57. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
58	58. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
59	59. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
60	60. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
61	61. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
62	62. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
63	63. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
64	64. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
65	65. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
66	66. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
67	67. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
68	68. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
69	69. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
70	70. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
71	71. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
72	72. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
73	73. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
74	74. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
75	75. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
76	76. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
77	77. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
78	78. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
79	79. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
80	80. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
81	81. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
82	82. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
83	83. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
84	84. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
85	85. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
86	86. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
87	87. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
88	88. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
89	89. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
90	90. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
91	91. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
92	92. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
93	93. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
94	94. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
95	95. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
96	96. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
97	97. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
98	98. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
99	99. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf
100	100. LD TB 398 K2/K3	285 ± 3mm	253 ± 3mm	2750 Kgf	192 ± 3mm	4225 Kgf

Koefisien pegas dan peredam pada kereta api

DAFTAR PUSTAKA

1. Anuar, Kaspul. 2014. *Rancang Bangun dan Studi Karakteristik Respon Getaran Sistem Suspensi dengan Hydraulic Motor regenerative Shock Absorber*. Surabaya.
2. Arziti, Marcos. 2010. *Harvesting energy from Vehicle Suspension*. Tampere
3. Fox, Robert W. *Introduction Fluid Mechanic* 6th edition
4. Kristanto, Yohanes Dhani. 2012. *Pemodelan dan Analisa dinamika Energi Terdisipasi pada Gerak Vertikal Suspensi Bogie dan Suspensi Gerbong Kereta Api*. Surabaya.
5. Luo, R. K. 1995. *Dynamic Stress Analysis of an Open Shaped Railway Bogie Frame*. London.
6. Nielsen, J. C. O. *Vertical Dynamic Train/Track interaction- Verifying a Theoretical Model by Full- Scale Experiments*. Gothenburg.
7. Rao, Singiresu. *Mechanical Vibrations* 5th edition. University of Miami.
8. Wang, J. F. 2001. *Vibration Supression for high speed railwats bridges using tuned mass dumpers*. Maoli.
9. Wang, Rucien. 2014. *Modelling and validation of a Regenerative Shock Absorber System*. Bedfordshire.
10. Noor, Skriptyan. 2015. *Studi Pengaruh Perubahan Redaman Mekanik dan Redaman Elektrik terhadap redaman total dan Daya Bangkitan pada Hydraulic Regenerative Suspension*. Surabaya.

Halaman ini Sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Surabaya, 3 Januari 1992. Merupakan anak ketiga dari empat bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Dahlia Surabaya, SD An-Najiyah Surabaya (1998-2004), SMP Negeri 12 Surabaya (2004-2007), SMA Negeri 10 Surabaya (2007-2010), Diploma 3 Teknik Mesin ITS (2010-2013). Saat D3 penulis memilih bidang studi manufaktur. Setelah lulus Diploma 3 penulis melanjutkan studi di Strata 1 Teknik Mesin, FTI-ITS Surabaya dan terdaftar dengan NRP 2113 105 025.

Di Jurusan Teknik Mesin, penulis mengambil bidang studi Desain pada Laboratorium Vibrasi dan Sistem Dinamis sebagai bahasan Tugas Akhir. Selama masa kuliah penulis telah mengikuti berbagai macam seminar, pelatihan dan workshop mengenai berbagai macam ketrampilan untuk meningkatkan *soft skill*. Penulis juga aktif dalam kegiatan di dalam lingkungan kampus terutama pada bidang sepakbola.

Jika ada informasi, pertanyaan maupun saran yang ingin disampaikan kepada Penulis, silakan menyampaikan melalui email rifqi.muqorrob92@gmail.com